



HAL
open science

L'approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole au service de la qualité des eaux souterraines. L'expérience d'une démarche de co-conception avec et par les agriculteurs.

Annabelle Richard

► **To cite this version:**

Annabelle Richard. L'approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole au service de la qualité des eaux souterraines. L'expérience d'une démarche de co-conception avec et par les agriculteurs.. Sciences agricoles. Institut agronomique, vétérinaire et forestier de France, 2018. Français. NNT : 2018IAVF0008 . tel-03392436

HAL Id: tel-03392436

<https://pastel.hal.science/tel-03392436v1>

Submitted on 21 Oct 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

NNT : 2018IAVF0008

THESE DE DOCTORAT

Préparée à l'Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech)

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Institut agronomique vétérinaire et forestier de France

Spécialité : Sciences agronomiques

École doctorale n° 581

Agriculture, alimentation, biologie, environnement et santé (ABIES)

par

Annabelle RICHARD

L'approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole au service de la qualité des eaux souterraines. L'expérience d'une démarche de co-conception avec et par les agriculteurs.

Directeur de thèse : Christophe DAVID

Co-encadrement de la thèse : Marion CASAGRANDE & Marie-Hélène JEUFFROY

Thèse présentée et soutenue à Lyon le 21 juin 2018 :

Composition du jury :

Mme Marianne LE BAIL, Professeure, AgroParisTech

Présidente

Mme Mireille NAVARRETE, Directrice de Recherche, INRA Avignon

Rapporteur

M. Pierre-Yves LE GAL, Chercheur (HDR), CIRAD

Rapporteur

M. Olivier BARRETEAU, ICPEF, IRSTEA

Examineur

Mme Marion CASAGRANDE, Chargée de mission, ITAB

Examinatrice

M. Christophe DAVID, Directeur scientifique, ISARA-Lyon

Directeur de thèse

*« L'ironie est que la science
n'a servi qu'à mettre en évidence
combien la connaissance humaine est petite »*

Masanobu Fukuoka

REMERCIEMENTS.

Cela fait plusieurs jours voire plusieurs semaines que je réfléchis (sur mes trajets en vélo) à mes remerciements en pensant à chaque fois à de nouvelles personnes sans qui je ne pourrais pas écrire ces pages. Après ces longues réflexions et rêves éveillés, me voilà à entamer « *cette phase bien périlleuse du travail de thèse car survenant à un moment où le thésard fourbu sent venir l'odeur de l'écurie. Pressé d'en finir, soulagé, il ne prend pas suffisamment garde aux nombreux pièges qui peuvent encore se présenter sur sa route.* » Malgré cette mise en garde avisée de Florian CELETTE, chercheur que j'ai eu la chance de côtoyer pendant mon travail de thèse, je commence.

Au cours de cette thèse, j'ai eu une chance immense d'être encadrée non pas par un mais trois chercheurs, mon directeur de thèse Christophe DAVID, mon encadrante Marion CASAGRANDE et co-encadrante Marie-Hélène JEUFFROY. On pourrait se dire que cela rendait compliqué l'encadrement. Au contraire ! Il n'a été que plus riche, et les réunions à quatre ont été pour moi une réelle source de réflexions et d'énergies pour continuer ce travail de recherche. Au sein de ce trio de choc, je tiens tout d'abord à remercier Marion CASAGRANDE, qui a toujours su me comprendre, même lorsque les mots me manquaient, et qui a su orienter et guider mes questions sans imposer ses propres idées. Merci de m'avoir donné cette chance de mener à bout trois ans de travaux de recherche et de m'avoir toujours fait confiance. Je tiens à remercier Christophe DAVID, qui malgré sa fonction de directeur de recherche a réussi à être présent et à l'écoute. Merci pour ces encouragements que tu as pu me transmettre à l'oral comme à l'écrit que j'ai gardé précieusement : « *Merci à toi pour la qualité de la préparation et les échanges ... cela me sort des multiples dossiers de l'école et ce type de journée m'oxygène !!* ». Enfin, je remercie Marie-Hélène JEUFFROY, qui a toujours été à l'écoute et qui a porté un regard extérieur indispensable. Ta double casquette chercheuse/agricultrice a été très précieuse et pertinente vis-à-vis de mes questionnements. On parle souvent de thèse en recherche qui se passe mal du fait de l'absence d'encadrement et je me rends compte d'autant plus de la chance que j'ai eu d'avoir trois tuteurs qui se complémentaient à merveille !

Le second groupe de personnes que j'aimerais remercier du fond du cœur sont les agriculteurs ! Si vous ne m'aviez pas accordé votre temps et votre énergie, je n'aurais tout simplement pas pu écrire de thèse. Alors je tiens à vous nommer un par un en associant un qualificatif qui me rappellera à vous. Je remercie Pierre SAUVAT, l'aventurier qui se lance à l'heure où j'écris à la plantation de pistachiers sur sa parcelle de Valensole ; Nicolas PAUL, l'agriculteur au grand cœur ; Marc RICHAUD, le rieur ; les « deux Guillaume » comme on les appelle car inséparables : LEROUX, le surfeur et JOUBERT, le passionné ; Michel et Adrien GIVAUDAN, les internationaux ; Nicola BRUNETTI, le visionnaire ; Philippe ROBERT, le paisible ; Nicolas SIMONDI, le discret ; Hugues MASUCCO, l'attentionné ; Daniel BREMOND, le savant ; Julien GOZZI, le jeunot ; Guy GIRAUD, le penseur ; Jean-Luc CHARBONNIER, le révolté, Les TORINO, les calmes ; Laurent BRUN, le paisible ; Damien DRAC, l'indépendant ; Sandrine MARGAILLAN, la cavalière ; Daniel MARGANT, le timide ; David DAOUST, le vigoureux ; Didier LORCHEL, le sage ; Didier BLANC, le téméraire ; Gilbert BOURICAN, le soucieux du bien faire ; Henri CHASSET, le curieux ; Jacques DUMONT, le bienveillant ; Lionel JAMBON, le déconneur ; Nicolas GERARD, l'aîné ; Jean-Luc MARTIN, l'héliculteur ; Pierre

LAURENT, le résistant ; Serge GENEVAY, le syndicaliste ; Roland GEAY, le chasseur ; Bertrand SAIGNANT, le chercheur.

Les entretiens et ateliers que j'ai pu faire avec vous, sont des moments privilégiés ! J'ai eu une chance incroyable que vous m'ayez accordé du temps libre, que vous n'avez pas beaucoup, pour que je puisse aboutir à ce travail de recherche que je présente maintenant. J'ai pu partager avec vous l'envie qui vous anime de faire évoluer vos systèmes agricoles et je reste admirative de votre passion et capacité à prendre des initiatives et à vous remettre en cause.

Ce travail est le fruit de nombreux échanges, et je voudrais aussi exprimer mes remerciements aux chercheurs qui ont pris du temps et qui ont contribué à mes recherches. Je remercie tout d'abord tous les membres de mon comité de thèse, Alexandre JOANNON, Guy TREBUIL, Laurence GUICHARD, Laure KHUFUSS, Hélène BRIVES et Marc MORAINÉ, pour votre temps et votre expérience précieux afin de m'aider à fixer un cap. Cela me donne l'occasion de remercier tous ceux qui ont donné de leur temps et partager leur expertise pour répondre à mes questions. Je voudrais, à ce titre, remercier tout particulièrement Jean-François VIAN, Joséphine PEIGNE, Audrey VINCENT ; pour vous être rendu disponibles et avoir pris du temps afin de répondre au mieux à mes questions et réflexions. Merci au reste de l'équipe de chercheurs de l'ISARA, Mathieu GUERIN pour ton soutien sur la défense du statut de doctorant ; Emilie OLLION, Florian CELETTE et Vincent TOLON pour votre bienveillance ; Thierry JOLY pour tes blagues et histoires incongrues en pause-café. Enfin, je tiens à remercier, sincèrement, Hager CETIN et Valérie MANN de m'avoir facilité la logistique lorsque j'allais sur le terrain et Fatiha BENSEMRA de m'avoir aidé pour finaliser mon manuscrit. Merci à toi, Hager, d'avoir été une oreille attentive et d'une grande gentillesse.

Je tiens ensuite à exprimer mes remerciements aux membres du jury Mireille NAVARETTE, Pierre-Yves LE GAL, Marianne LE BAIL et Olivier BARRETEAU qui ont accepté de participer à l'évaluation de ce travail.

Je remercie également l'ISARA-Lyon qui m'a accueillie pour la réalisation de ce travail, ainsi que l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, qui a financé le projet de recherche dans lequel s'inscrivait cette thèse.

À présent, je tiens tout particulièrement à remercier, une personne et amie aussi sensible que moi au monde agricole et à ses problématiques, Audrey. Alors, toi ma belle, comment j'aurai fait sans toi ? Durant ces trois ans, j'ai dû t'appeler 795 heures, peut-être une heure de plus, je ne sais plus ! Enfin, ça en fait des heures à discuter, débattre, s'engueuler (quand têtue, je n'étais pas d'accord avec toi), se faire rire, se remettre en question, s'encourager ! Tes questions, ton raisonnement pointu ont toujours su m'orienter vers une introspection pertinente qui m'a fait grandir ! Je ne serais pas là sans toi. MERCI, MERCI et ENCORE MERCI de ce temps que tu m'as accordé à réfléchir avec moi à comment animer au mieux les ateliers avec les agriculteurs, à relire ma thèse, à me pousser dans mes retranchements par tes nombreuses interrogations, à m'épauler tout simplement....

Pour m'épauler, je tiens à remercier Aurélie. On est tellement proche, qu'on a décidé de faire une thèse en même temps pour s'accompagner dans toutes les épreuves. Toi aussi je ne sais pas combien de temps on a pu passer au téléphone durant ces trois ans. On ne parlait pas de nos sujets de thèse, non ! Mais de

tout ce qui entoure une thèse ; le stress de rendre un papier à temps, l'épreuve du premier COPI, le manque d'inspiration, le ras-le-bol général... Merci de m'avoir toujours encouragée et d'avoir toujours été présente et à l'écoute malgré tes épreuves personnelles !

Sur ma lancée des nombreux coups de fil passés durant ces trois belles années, je tiens à remercier « mamoune ». Mam, avant tout, je te remercie d'avoir toujours répondu présente pour m'écouter parler de mes réflexions, mes déceptions, mes angoisses, mes moments de bonheur que j'ai eu beaucoup au cours de ces trois ans ! En effet, ça a été les montagnes russes et je me suis toujours sentie protégée par toi, mamine, alors merci ! Des montagnes russes, je crois qu'une personne peut en témoigner, pas vrai Philou ? je te remercie d'avoir été indulgente avec moi et bienveillante malgré certaines difficultés que tu traversais ! En évoquant ma sœur Philou, je ne peux évidemment pas oublier mes quatre autres sœurs et mon frère. Je remercie ma sœur aînée, et marraine Maud puis Mag, Ben, Fan et Capu. Merci pour votre soutien ! Enfin, je tiens à remercier mon père de m'avoir toujours épaulée et fait confiance et qui m'a permis d'être assurée face à mes choix lors de ces trois années de thèse. Malgré ton point de vue critique des agronomes d'hier qui ont participé à la révolution verte, j'espère que mon parcours te fera changer d'avis sur les agronomes d'aujourd'hui...

Dans la continuité du noyau dur de mes proches, je tiens à remercier mes deux amies d'enfance, Marina et Lucie. Sur ces trois ans, nos échanges ont été plus ou moins intenses, mais vous avez toujours été là pour moi. Ces trois weekends, à Marseille, au refuge du Nants-du-beurre et à Annecy, ont été un vrai bol d'air frais, durant ces trois années ! Vous avez été d'un vrai soutien moral. Des amies d'enfance, je tiens à remercier Solène ! Merci d'avoir eu cette ingénieuse idée de partir au Sénégal au moment où j'en avais le plus besoin. *Sobo badé* a été un vrai refuge et ce voyage m'a redonné beaucoup d'énergie pour terminer cette thèse ! Merci à toi, Isaure, de m'avoir accueilli deux fois chez toi à Genève pour deux weekend inoubliables, en montagne ou dans le passé (le musée Chaplin ;) !

Je tiens à remercier, « mes colocs » ; Ambre, Charlotte, Math et Zi. Grâce à vous j'ai pris confiance en moi durant mes années d'école. Et cela m'a donné le courage d'entreprendre ces trois ans d'étude. Dans mes études, j'ai notamment eu la chance de rencontrer Axel et Martin, qui m'ont toujours fait confiance et qui m'ont surtout beaucoup fait rire ! Merci à vous deux, mes humoristes !

Enfin, au cours de ces trois ans, j'ai eu la chance d'être entourée de personnes bienveillantes, à l'écoute et parfois je n'ai pas eu à faire beaucoup d'efforts pour les rencontrer ; dans mon bureau par exemple ! Je tiens à remercier Sylvain, Manon, Ptite Julie, Lama, Laura, Justine et Olivier ; qui ont permis des craquages du vendredi et parfois du mardi ! Enfin, de mes co-doctorants, je remercie Marie, Julie, Damien et Agathe. Des stagiaires, je remercie Pti Sylvain et Valentin, qui ont permis une transition en douceur de la vie d'étudiante à la vie de doctorante. De tous mes collègues, je tiens à remercier particulièrement Manon, Agathe et Olivier qui ont été très important durant ces trois années et qui ont su trouver les mots pour me soutenir.

À mon arrivée à Lyon, j'étais sans repère mais j'ai eu la chance d'être accueillie par ma cousine que je tiens tout particulièrement à remercier. Je te remercie, Amandine, pour ta gentillesse et ta joie de vivre ! Je regrette que tu sois partie aussi tôt de Lyon. Mais j'ai eu le réconfort d'avoir ma cousine Doro avec qui j'ai pu partager de chouette moments autour d'une pizza et d'une/plusieurs bières à la *Pinte Douce*. Merci

Doro de m'avoir autant encouragé dans mes choix. Merci à toi « Math de l'agence de l'eau », pour ton soutien et ton écoute. Merci à Grande Julie et Hélène pour les chouettes moments que l'on a partagé ensemble. Enfin, merci à mon ancienne coloc, Manon. J'ai été ravie d'être ton cobaye pour que tu te formes à la réflexologie et de partager avec toi notre passion pour les films de Dolan.

Merci à Cédric de m'avoir initié au monde de l'improvisation et merci à tous les joueurs avec qui j'ai eu la chance de jouer et me défouler durant ces trois ans. Je remercie les personnes qui ont accepté de m'accueillir dans la troupe *A Point Nommé* que l'on a construit ensemble. Merci Raphaëlle, Thomas, Coralie, Audrey, Laurianne, David, Lise, Fred, charlotte, Marc et Edouard.

Enfin, je tiens à remercier, une seconde fois pour certains, tous les relecteurs de cette thèse. Merci à toi Audrey, Marina, Manon, Mamine, Maud, Mag, Ben, Fan, Cap, et Philou (la ribambelle), Guillaume, Jules et enfin Denes.

Enfin, enfin et enfin... ça en fait du monde et il m'en a fallu des trajets à vélo pour n'oublier personne. Mais je n'ai pas envie de commencer ce dernier paragraphe par 'enfin'. Ce ne serait pas le juste mot pour débiter mes remerciements envers celui qui m'a épaulé quotidiennement depuis déjà plus d'un an. Quelle chance j'ai eu de te rencontrer ! Merci à toi, Guillaume VIC ! Merci d'avoir eu la curiosité de t'intéresser de si près à mon sujet de recherche. Merci à toi pour ton calme face à mes coups de stress, pour tes blagues face à mes déceptions et pour tes câlins face à ma tristesse. Merci pour les millions de relecture que tu as pu faire sur ce manuscrit et enfin, parce que je te l'ai pas dit assez, merci pour ta patience.



SOMMAIRE.

LISTE DES ABREVIATIONS.....	1
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1. ETAT DE L'ART ET PROBLEMATIQUE	4
1. La politique de l'eau en France et les raisons de son efficacité partielle.....	5
2. Protéger et/ou reconquérir la qualité des eaux souterraines : quelle échelle d'approche ?	21
3. Engager un changement dans la durée : les apports d'une approche participative.....	34
4. Questions et démarche de recherche.....	40
CHAPITRE 2. PRESENTATION DES DEUX CAS D'ETUDE	44
1. Critères de choix des territoires étudiés.....	45
2. Caractéristiques des deux terrains d'étude	47
3. Étude des mesures de la politique de l'eau : deux cas d'étude sur des AAC aux contextes réglementaires similaires	49
4. Démarche participative : deux groupes d'agriculteurs avec des dynamiques contrastées	57
CHAPITRE 3. EVALUATION DE L'ADEQUATION DES MESURES ISSUES DE LA POLITIQUE DE L'EAU AVEC LE FONCTIONNEMENT DES EXPLOITATIONS AGRICOLES.....	60
1. Étude de l'adéquation des mesures de la politique de l'eau avec le fonctionnement des exploitations agricoles de l'AAC de la plaine des chères	61
2. Étude de l'adéquation des mesures de la politique de l'eau avec le fonctionnement des exploitations agricoles de l'AAC d'Oraison	83
3. Synthèse de l'analyse de la politique de l'eau sur les deux terrains.....	91
CHAPITRE 4. DÉMARCHE DE CO-CONCEPTION DE SCÉNARIOS SUR-MESURE À L'ÉCHELLE DE L'EXPLOITATION AGRICOLE.....	100
1. Mise au point de la méthode participative de conception de scénarios sur mesure et application sur les deux cas d'étude	101
2. Les recommandations co-conçus pour répondre aux objectifs des agriculteurs et diminuer la pression polluante sur les eaux souterraines.....	121
CHAPITRE 5. DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	132
1. Quels apports scientifiques de la démarche développée dans cette thèse ?	133
2. Quelles perspectives opérationnelles pour une reconquête de la qualité des eaux souterraines ?	147
CONCLUSION	154
REFERENCES.....	158
TABLE DES MATIERES.....	173
TABLE DES FIGURES.....	177
TABLE DES TABLEAUX.....	180
TABLE DES ENCADRES.....	182
ANNEXES.....	183

LISTE DES ABREVIATIONS.

AAC	Aire d'Alimentation de Captage
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
C	Charges totales/Total Charges
CA	Chambre d'Agriculture
CIPAN	Culture Intermédiaire Piège A Nitrates
CIVAM	Centres d'Initiatives pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural
CMMO	Charges de Mécanisation et de Main d'œuvre
CO	Charges opérationnelles
CUMA	Coopérative d'Utilisation de Matériel Agricole
DCE	Directive Cadre sur l'Eau
DLVA	Communauté d'Agglomération Durance Luberon Verdon
DN	Directive Nitrates
DSS	decision support system (DSS)
DTPA	Diagnostic Territorial des Pressions Agricoles
EA	Exploitant Agricole
IFT	Indice de Fréquence des Traitements
IFTSA	Indice de Fréquence des Traitements par substance active
LEMA	Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques
MAE	Mesures Agro-Environnementales
MAET	Mesures Agro-Environnementales Territoriales
MASC	Multi-Attribute Assessment of the Sustainability of Cropping systems
MD	Marge Directe
N	Azote
ND	Nitrate Directive
NVZ	Nitrate Vulnérable Zone
ONEMA	Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
PA	Programme d'Actions
PAC	Politique Agricole Commune
PAEC	Projet Agro-Environnemental et Climatique
Qf	quantité de fertilisant azoté
QSA	Quantité de Substance Active
SA	Substance Active
SAGE	Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SAU	Surface d'Agriculture Utile
SDAGE	Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SdC	Système de culture
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
UTH	Unité de Travail Humain
WH	Working Hour ou Temps de travail
Y	Yield/Rendement
ZIP	Zone d'Intervention Prioritaire
ZSCE	Zone Soumise à Contrainte Réglementaire
ZVN	Zone Vulnérable Nitrates

INTRODUCTION

En France, 62 % des volumes prélevés pour l'alimentation en eau potable proviennent des nappes phréatiques (Ifen, 2003). L'intensification de l'agriculture opérée à partir des années 1960, a conduit à une augmentation des performances des cultures, mais aussi à une dégradation de la qualité de l'eau¹ (Souchère et al., 2003). Cette intensification s'est accompagnée d'une utilisation accrue d'engrais minéraux et de pesticides et d'une spécialisation des exploitations et des régions (concentration de l'élevage, réduction de la diversité des cultures, diminution des prairies permanentes). Par conséquent, la pollution diffuse des eaux de captages, par les nitrates et les matières actives qui composent les pesticides, est un problème mis en évidence dès 1980 (Hénin, 1980) et encore d'actualité (Commissariat général du développement durable, 2016).

Afin d'assurer **une eau potable de qualité** et limiter au maximum le recours au traitement curatif avant distribution de l'eau, les instruments réglementaires d'incitation aux changements de pratiques agricoles se sont accrus (Thoyer and Saïd, 2007). Depuis les années 1950, où quelques décrets réglementaient les pesticides les plus nocifs, des réglementations sont apparues au niveau européen depuis les années 90 telles que la **Directive Nitrates (DN)** (91/676/EEC) et la **Directive Cadre Sur l'eau (DCE)** (2000/60/EEC). À l'échelle française, la loi sur l'eau et les milieux aquatiques en 2006 a fait de la lutte contre les pollutions diffuses agricoles une priorité qui a été réaffirmée lors du Grenelle de l'environnement en 2009 (Vincent, 2016). Cette politique de restauration de la potabilité fait l'objet de deux logiques d'interventions auprès des agriculteurs :

L'une **obligatoire**, qui découle de l'application de la DN visant à réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole, à l'échelle d'une Zone Vulnérable Nitrates (ZVN). Sur ces zones, les agriculteurs sont contraints d'adopter les mesures inscrites dans un Programme d'Action (PA) national qui visent essentiellement des changements de pratiques (période d'épandage, stockage des effluents, bandes d'herbe entre champs et cours d'eau ou encore implantation d'un couvert végétale pendant les périodes hivernales). Suite à la condamnation de la France par la cour de justice européenne en 2012, pour mauvaise application de la DN, 18 860 communes sont classées en ZVN, soit 860 de plus.

L'autre, **volontaire** (pouvant être rendue obligatoire²), qui découle de l'application de la DCE à l'échelle de **l'Aire d'Alimentation de Captage (AAC)**, qui correspond l'ensemble des surfaces où toute goutte d'eau tombée au sol est susceptible de parvenir jusqu'au captage. Cette intervention volontaire repose sur le conseil et une sensibilisation agricole à l'échelle de territoires plus ciblés (Programme d'Action sur une AAC, actions Ferti-mieux...). Actuellement **1000 captages prioritaires** sont identifiés pour la période 2016–2021 (Ministère de l'environnement, 2013).

Malgré ces dispositifs réglementaires, d'après le ministère de la transition écologique et solidaire, les nitrates sont, avec les pesticides, les polluants les plus détectés dans les eaux souterraines de la métropole. En 2014, **31 % du territoire des eaux souterraines dépasse la norme « eau potable »** pour un pesticide³. Les plus détectés sont les herbicides, et si la présence de certaines molécules aujourd'hui

¹ Teneur élevée en nitrates (seuil à 50mg/L) et/ou en produits phytosanitaires (seuil à 0,1µg/l et 0,5µg/l pour le total)

² Un Programme d'Action (PA) peut devenir obligatoire si après une période d'essai d'application de ce PA, la qualité de l'eau ne s'améliore pas.

³ <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/246/0/presence-pesticides-eaux-2014-evolution-depuis-2008.html>

interdites (*e.g.* l'atrazine) tend à diminuer, c'est la détection d'autres molécules qui augmente telle que le glyphosate contenu dans le Roundup® et son métabolite de dégradation l'AMPA (Commissariat général du développement durable, 2016). La présence de nitrates, à **des concentrations entre 25 et 40 mg/l, affecte 37 % de la superficie de la métropole**, délimitée en majorité par la moyenne montagne (données 2016).

Ce constat **d'efficacité partielle** pour reconquérir la qualité des eaux souterraines (Oenema et al. 2009) résulte de plusieurs facteurs. La **diversité des acteurs** qui contribuent à l'élaboration des PA entraîne une lenteur dans les démarches et des difficultés pour trouver des accords (Brun, 2003; Ghiotti, 2010). La **faible représentativité et implication des agriculteurs** dans le processus d'élaboration des programmes d'action présente des limites sur l'appropriation des mesures par les agriculteurs (Barataud, 2014). Enfin, la **standardisation des mesures** proposées constitue une fragilité dans leur performance agronomique car faiblement adaptées aux caractéristiques locales (Kuhfuss et al., 2012; Menard et al., 2014; Soulard, 2005).

Dans ce contexte de reconquête de la qualité de la ressource en eau souterraine, des **démarches participatives** ont été développées en recherche et développement s'appuyant sur **l'implication des agriculteurs** situés sur ce territoire à enjeu eau (Barataud, 2014). Les solutions qui ont émergé de ces différentes approches concertées concernent différentes échelles :

1. l'échelle de l'îlot de parcelles en construisant des **systèmes de culture**⁴ qui suivent majoritairement une logique **d'allongement des rotations**, et de **couverture du sol** au-delà des pratiques d'apports. Par exemple, pour le captage de Briennon-sur-Armançon (89), les scénarios issus de la méthode participative développée par Reau et al., (2012) proposent l'insertion de diverses cultures de printemps (pois, orge, avoine) et de couverts végétaux avant les cultures d'hiver (Paravano et al., 2016; Ravier et al., 2015a). Sur l'impluvium de Vittel (88), cela s'est traduit par l'introduction du sorgho moins consommateur en eau et intrants azotés que le maïs fortement présent dans les rotations (Hellec et al., 2013). Dans les deux cas, ces deux démarches ont permis de sensibiliser les agriculteurs au phénomène de lixiviation des nitrates, de ses origines (*e.i.* minéralisation automnale et pluie hivernale) et de proposer des pratiques qui permettent de **limiter le recours aux intrants azotés**.
2. l'échelle de **l'Aire d'Alimentation de Captage (AAC)** en construisant des scénarios **de répartition de systèmes de culture** économes en intrants sur la Surface Agricole Utile (SAU) composant l'AAC. Par exemple, pour les captages alimentant la ville de Berck sur mer (62), le scénario prospectif réalisé avec la méthode Co-click'eau, est basé sur une répartition de systèmes de culture économes en intrants et en agriculture biologique sur respectivement 80% et 5% de la SAU composant l'AAC (Barataud et al., 2016; Chantre et al., 2012; Gisclard et al., 2015). D'autres scénarios de conversion en agriculture biologique de plus grande ampleur sont notamment

⁴ « Ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique. Il se définit par (i) la nature des cultures et leur ordre de succession (ii) les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés pour les cultures retenues » (Sebillotte, 1990)

proposés sur les captages de Munich (Allemagne) (Barataud, 2014) et Lons-Le-Saunier (39) (Allain, 2013). Sur le bassin de Rio Mannu (Sardaigne Italie), les scénarios proposés visent la diminution de l'utilisation des intrants azotés de 20% et l'introduction du colza pour rompre la monoculture de blé sur une partie de l'aire afin de diminuer la charge en pesticides (De Girolamo and Lo Porto, 2012).

À notre connaissance, aucune démarche participative visant à restaurer la qualité des eaux souterraines ne s'est saisie **explicitement de l'échelle de l'exploitation agricole**. En effet, toutes ces démarches ont proposé des systèmes de culture plus économes en intrants et moins polluants co-conçus sans prendre en compte **explicitement** l'ensemble du **fonctionnement de l'exploitation agricole** dans la réflexion, comme les **ressources matérielles et humaines**. Les exploitations agricoles, composées de combinaisons de système de culture, constituent pourtant une unité de gestion du territoire, pilotée par des agriculteurs. On suppose donc que travailler à cette échelle permettrait de passer de l'échelle de système de culture à celle du territoire en garantissant la proposition de scénarios cohérents pour les agriculteurs.

L'objectif de cette thèse est d'explicitement prendre en compte le fonctionnement de l'exploitation agricole afin de concevoir et de favoriser sa transition vers des combinaisons de systèmes de culture qui répondent à l'enjeu de protection de la qualité des eaux souterraines.

Pour répondre à cet objectif, nous allons, en **chapitre 1**, exposer la **problématique de thèse** et l'état de l'art à travers les différents champs de la littérature. Ce chapitre est suivi d'une présentation des **deux cas d'étude, chapitre 2**, sur lesquels reposent les résultats des chapitres 3 et 4 qui organisent la thèse.

Le **chapitre 3** présente l'étude de l'adéquation des mesures de la Politique de l'eau avec le fonctionnement des exploitations agricoles présentes sur les territoires à enjeu eau (AAC, ZVN). Cette analyse résulte du constat du taux élevé de l'abandon et la non-adoption des mesures de la politique de l'eau par les agriculteurs. Il s'agit dans ce chapitre, de développer et présenter un cadre d'analyse à l'échelle de l'exploitation agricole qui sera mobilisé tout au long de cette thèse.

Le **chapitre 4** concerne la conception et l'évaluation de scénarios de changement de pratiques, cohérents avec le fonctionnement des exploitations agricoles et qui permettent de protéger la qualité des eaux souterraines. Ce chapitre repose sur la présentation et l'application d'une méthode participative qui a pour particularité de n'impliquer que les agriculteurs.

Le **chapitre 5**, est consacré à la **discussion générale de la thèse**. Nous aborderons les apports scientifiques de la thèse avant de discuter des sorties opérationnelles associées aux deux méthodologies développées et proposées aux acteurs de l'eau. Enfin, nous concluons sur les résultats génériques et les perspectives de ces travaux de thèse.

Chapitre 1. ETAT DE L'ART ET PROBLEMATIQUE

1. LA POLITIQUE DE L'EAU EN FRANCE ET LES RAISONS DE SON EFFICACITE PARTIELLE

1.1 Contamination des eaux souterraines

1.1.1 Notions générales

Afin d'avoir une bonne compréhension des enjeux de la qualité des eaux souterraines, il convient d'introduire quelques notions indispensables, reprises tout au long de ce manuscrit.

Les **eaux souterraines** représentent les eaux infiltrées dans le sol, circulant dans les roches perméables qui, accumulées au-dessus d'une couche imperméable, forment une nappe souterraine. Il faut distinguer les nappes libres, dont la surface peut osciller librement, les nappes alluviales, souvent en relation avec un cours d'eau, et les nappes captives, qui sont isolées de la surface du sol par une formation géologique imperméable. L'eau en mouvement est dénommée 'nappe', et la roche réservoir 'l'aquifère'. Une masse d'eau souterraine est un volume distinct et homogène d'eau souterraine, à l'intérieur d'un ou plusieurs aquifères.

En France, la réglementation fixe des valeurs limites de qualité des eaux destinées à la consommation humaine, prélevées majoritairement dans les eaux souterraines. La concentration limite en nitrates est fixée à 50mg/L au robinet du consommateur. Au-delà de ce seuil, les nitrates peuvent engendrer, lors d'une consommation régulière et importante, un empoisonnement du sang des nourrissons appelé méthémoglobinémie, ou encore maladie de l'enfant bleu (Bruning-Fann and Kaneene, 1993). Concernant les pesticides, substances ou produits destinés à lutter contre les organismes jugés nuisibles, qu'il s'agisse de plantes, d'animaux, de champignons ou de bactéries, la teneur limite est fixée à 0,1µg/L pour chaque pesticide, et 0,5µg/L pour le total des pesticides utilisés.

La pollution par l'activité agricole des eaux souterraines est liée au transport convectif de ces substances polluantes, qui sont soit lessivées (transport sous forme particulaire), soit lixiviées (transport sous forme dissoute) (Turpin et al., 1997). Les produits azotés sont le plus souvent sous forme dissoute. Nous parlerons donc de phénomène de **lixiviation** dans le reste du manuscrit.

1.1.2 Bilan et origine de la pollution actuelle des eaux souterraines par les nitrates et les pesticides

La France a connu une révolution agricole dans la seconde moitié du XX^{ème} siècle, qui a permis, entre autres, de quintupler les rendements en blé, de quadrupler la productivité des vaches laitières, et de décupler la surface de travail de chaque agriculteur (Mazoyer and Roudart, 1997). Cette forme de développement agricole a reposé sur l'emploi de fertilisants azotés et de pesticides, dans bon nombre de situations, peu ou pas maîtrisés (Laurent, 2012). Sur le plan environnemental, les impacts d'une telle évolution sont considérables et ont conduit à une augmentation des pollutions des milieux aquatiques souterrains et superficiels. Cette pollution des nappes phréatiques n'est pas seulement due à l'emploi non raisonné d'engrais chimiques ou organiques et à l'utilisation importante de pesticides.

Lorsque l'exploitation céréalière se spécialise, les rotations plus courtes et moins diversifiées peuvent faciliter le développement de ravageurs, maladies ou adventices, ce qui appelle un emploi accru de pesticides. Elle a donc été aggravée par la spécialisation de l'ensemble des systèmes de production et par le bouleversement des paysages ruraux qui s'en est suivi, augmentant notamment la vulnérabilité des milieux (Benoît et al., 1997; Gagné, 2012). Par exemple, dans les systèmes de polyculture-élevage, le recours aux cultures fourragères comme le maïs, en substitution aux prairies naturelles, laisse le sol nu une grande partie de l'automne, pendant laquelle les phénomènes de lixiviation sont les plus fréquents (Thiébaud et al., 2001). Par ailleurs, la viticulture et l'arboriculture offrent une large portion de sol nu qui favorise les transferts des nitrates et des pesticides vers les nappes souterraines. Dans les régions où l'activité productive des deux filières (viticole et arboricole) est fortement concentrée (par exemple le Sud-Ouest et le Sud-Est), diverses expertises confirment l'intensité des pollutions diffuses d'origine agricole (Bélis-Bergouignan and Cazals, 2006; Navarrete et al., 2012).

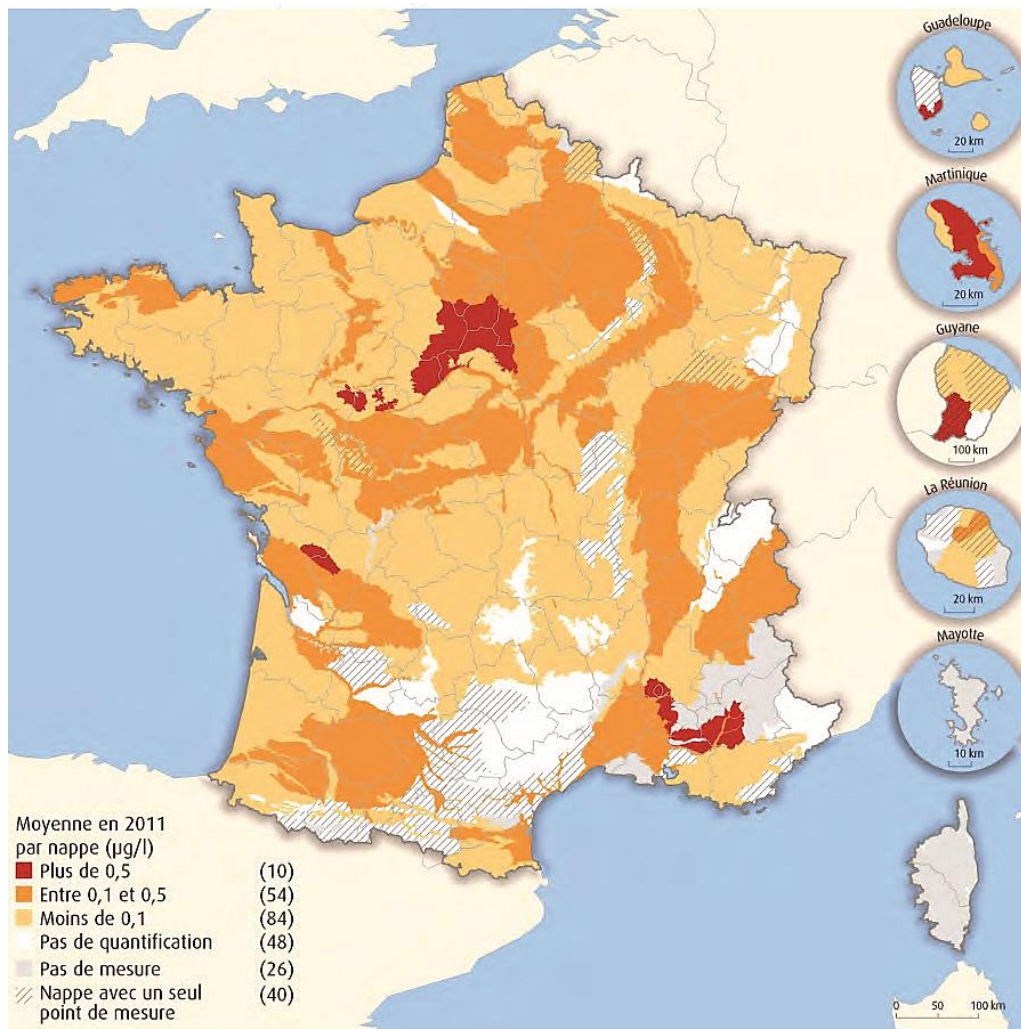


Figure 1. 1: Concentration moyenne en pesticides dans les eaux souterraines par unité hydrogéologique, en moyenne, en 2011 (sources : agence et offices de l'Eau : BRGM, banque ADES et BD Lisa. Traitements : SOeS, 2013⁵)

⁵<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/indicateurs-indices/f/1831/1902/pesticides-eaux-douces.html>

En 2011, les contaminations des nappes phréatiques par les pesticides, avec un total dépassant 0,5 µg/l (norme de qualité DCE), étaient essentiellement localisées en région Centre, dans les Charentes, le Vaucluse, les Alpes de Haute-Provence, en Martinique, ainsi qu'au Sud de la Guyane et de Basse Terre en Guadeloupe (cf. Figure 1.1). Les concentrations les plus élevées concernent, en France Métropolitaine, les zones de grande culture, d'arboriculture et de viticulture alors que, dans les DOM-TOM, ce sont les cultures spécialisées qui sont concernées (ex. production de bananes). Dans plusieurs régions (Nord de l'Hexagone, Nord Bretagne, couloir rhodanien et Sud-Ouest), les concentrations totales en pesticides des nappes sont fréquemment supérieures à 0,1 µg/l (cf. Figure 1.1). Les nappes sous couverture argileuse (en Aquitaine et à l'Est du bassin parisien) et les nappes de montagne, Est et Sud du Massif Central, Pyrénées, Alpes, sont les plus préservées puisqu'aucun pesticide n'y est détecté. Le reste du territoire montre une contamination généralisée des nappes, même si elle reste majoritairement faible, avec des concentrations inférieures à 0,1 µg/l, respectant les normes de qualité DCE.

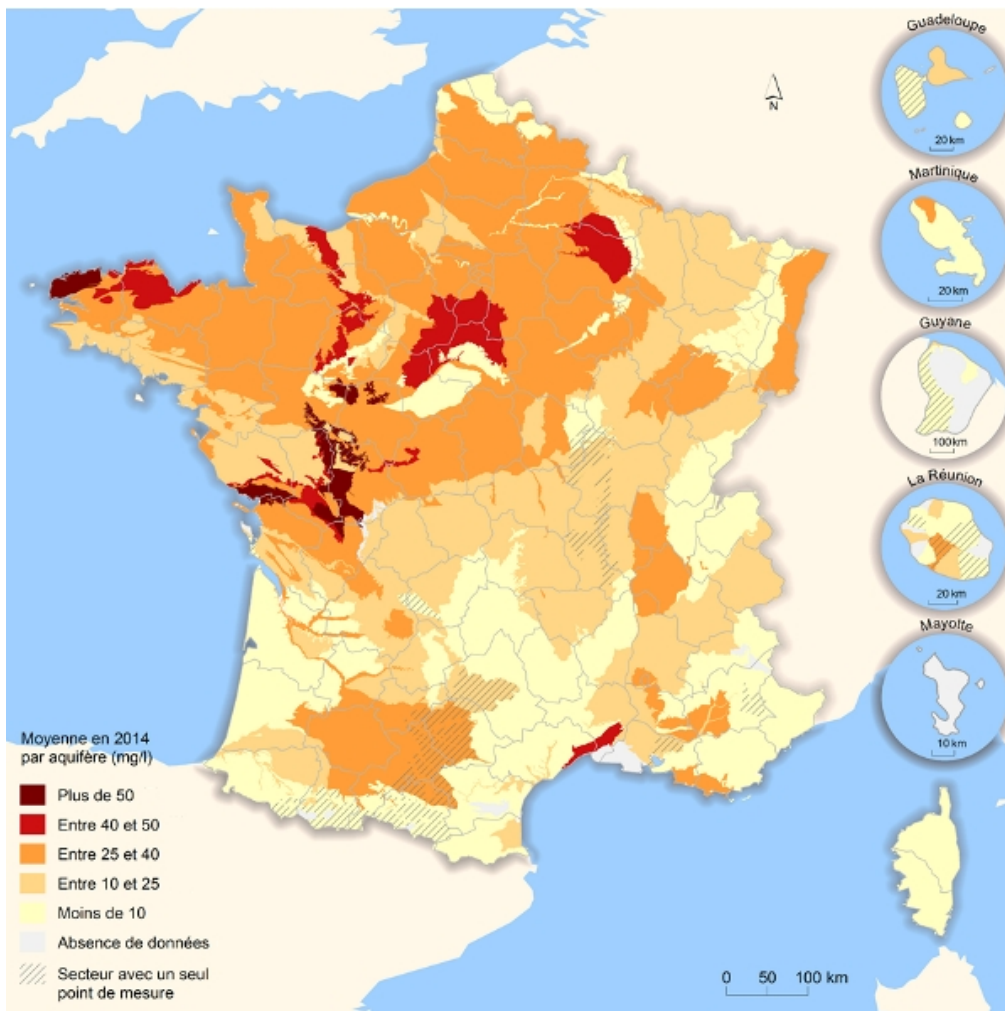


Figure 1. 2: Concentration moyenne en nitrates dans les eaux souterraines par unité hydrogéologique en 2014 (source : agences et offices de l'Eau ; ARS ; collectivités territoriales ; BRGME : banque de données Ades, 2013. Traitements : SOeS, 2016⁶)

⁶ <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/2000/0/evolution-nitrates-eaux-souterraines-1.html>

Concernant les nitrates, 37% de la superficie de la métropole est caractérisée par une teneur comprise entre 25 mg/L et 40mg/L. Les teneurs les plus élevées se situent dans la moitié Nord de la France métropolitaine, principalement en Bretagne, en lien avec l'élevage porcin dont les effluents d'élevage en excès créent des phénomènes de surfertilisation organique et, dans le Bassin parisien et la Nouvelle-Aquitaine, en lien avec des rotations très courtes (cf. Figure 1.2). On observe également une zone de forte concentration dans l'Hérault et le Gard, probablement due à une forte densité de cultures maraîchères de plein champ. Dans les DOM-TOM, on observe une plus faible contamination des eaux souterraines, avec 60% de leur surface présentant une teneur moyenne annuelle inférieure à 10%. La Réunion et la Martinique présentent des teneurs plus élevées en nitrates, dans les zones de culture spécialisée exigeante en fertilisants, qui sont respectivement la canne à sucre et la banane mais qui ne dépassent cependant pas la valeur seuil.

*Ainsi, environ **30% des eaux souterraines françaises** sont dans un état chimique médiocre dû à la pollution par les nitrates et les pesticides. Les eaux polluées de ces captages impliquent un traitement avant d'être distribué dans le réseau d'eau potable. D'après une étude de 2011⁷, le coût de ces traitements (uniquement pour le volet agricole) se situe entre 600 et 1100 millions d'euros annuel pour la France pour garantir la dépollution de l'eau.*

1.1.3 Les mécanismes de transfert de l'azote vers les nappes phréatiques et les facteurs influençant ce phénomène

L'azote dans le sol se retrouve sous plusieurs formes :

- **L'azote minéral** qui comprend les nitrates (NO_3^-), les nitrites (NO_2^-) et l'ammonium (NH_4^+) qui représentent 2 à 4 % de l'azote total du sol. C'est une forme soluble **hautement lixiviable**. Le Nitrate, sous forme minérale, a été identifié comme un des polluants des nappes phréatiques les plus fréquents (Lopez et al., 2015).
- **L'azote organique** intégré dans les quatre autres compartiments dans le sol ; les résidus de culture, la biomasse microbienne, la matière organique labile et stable (cf. Figure 1.3). Il s'agit d'une forme d'azote **qui migre difficilement** dans le milieu car peu soluble dans l'eau. Sa quantité dépend du type de sol, de sa richesse en matière organique, des résidus de culture, et des apports d'amendement organique.

Les apports en engrais azotés se font sous forme minérale (engrais minéraux) ou organique (fumier et lisier, compost, autres produits organiques) ; des échanges entre ces deux formes s'opèrent (cf. figure 1.3). La minéralisation qui consiste à transformer l'azote organique en ammonium, est influencé par des facteurs édaphiques (pH, granulométrie), climatiques (pluviométrie, température) et anthropiques (système de culture, travail du sol) (Kumar and Goh, 1999; Turpin et al., 1997; Watts et al., 2010). L'ammonium produit peut être utilisé par les micro-organismes et les champignons du sol (on parle d'organisation) ou bien transformé par les bactéries du sol en nitrates (nitrification). Ces nitrates peuvent

⁷ Rapport sur les coûts des principales pollutions agricoles de l'eau – Commissariat Général au Développement durable – septembre 2011.

par la suite être assimilés par la plante ou lixiviés. La lixiviation des nitrates vers les nappes phréatiques est influencée par différents facteurs agissant en interaction et regroupés en catégories (cf. Figure 1.3).

Les **facteurs édaphiques**, qui regroupent les propriétés chimiques, physiques, biologique du sol, sont un facteur majeur (cf. Figure 1.3). D'une part, la structure du sol influence l'infiltration de l'eau qui entraîne les nitrates dans les sols. D'autre part, comme il a été dit précédemment, les propriétés chimiques (*e.g.* pH) et biologiques du sol (*e.g.* concentration en matière organique, micro-organismes, bactéries, champignons) favorisent la minéralisation et la nitrification de l'azote organique et donc la concentration en nitrates dans le sol et leur potentielle lixiviation.

Les **facteurs anthropiques**, comprenant les pratiques agricoles sont des facteurs majeurs sur lesquels il est plus facile d'agir pour limiter le phénomène de lixiviation (cf. Figure 1.3). Par exemple, si un engrais est apporté à une période de faible besoin pour la culture, cet azote sera mobilisé par d'autres processus (comme la lixiviation) (Jeuffroy et al., 2013). Le travail du sol, par accroissement de la porosité structurale du sol, accroît notamment la minéralisation, et donc la potentielle lixiviation des nitrates générée s'ils ne sont pas absorbés par un couvert (Turpin et al., 1997). Par ailleurs, en l'absence de couverture végétale, les nitrates produits par les bactéries ou les apports directs ne seront donc pas utilisés par un couvert végétal. Le risque de lixiviation est alors accru.

Enfin, les **facteurs climatiques** déterminent la fréquence et l'intensité des évènements susceptibles d'entraîner l'azote hors de la zone racinaire vers les eaux souterraines (cf. Figure 1.3). Le risque de lixiviation est important lorsqu'une pluie efficace (la pluie excédentaire qui contribue directement à la lixiviation et au ruissellement) survient entre la date d'épandage et le prélèvement par les cultures. La lixiviation et les concentrations les plus importantes en nitrates s'observent généralement en automne lorsqu'il fait doux : la minéralisation est alors active, les pluies sont efficaces et les besoins des végétaux sont faibles ou nuls dans le cas des sols nus. Les années à automne doux et hiver humide, sont généralement des années de forte pollution nitrique, en l'absence d'un couvert automnal qui absorbe l'azote disponible dans le sol.

Les phénomènes de lixiviation des nitrates vers les eaux souterraines résultent donc d'un grand nombre de facteurs interdépendants (cf. Figure 1.3) édaphiques (propriétés physicochimiques et microbiologique des sols), anthropiques (niveau de fertilisation, travail du sol, couverture végétale) et climatiques (précipitations, températures).

1.1.4 Les mécanismes de transfert des pesticides vers les nappes phréatiques et les facteurs influençant ce phénomène

Les premiers produits phytosanitaires de synthèse (ou pesticides) sur le marché sont arrivés au cours des années 1940, afin de garantir une augmentation des rendements liée au contrôle des ravageurs et maladies des cultures et des adventices (van der Werf, 1996). Selon la Banque nationale des ventes de produits phytosanitaires, la quantité d'achats s'établit à 68 milliers de tonnes en 2015. La contamination des eaux souterraines par les substances actives des pesticides et les molécules issues de leur dégradation, appelées métabolites, a deux origines :

- Les **pollutions ponctuelles**, de nature accidentelle ou chronique, liés à des difficultés de manipulation de produits et de matériels avant et après traitements.

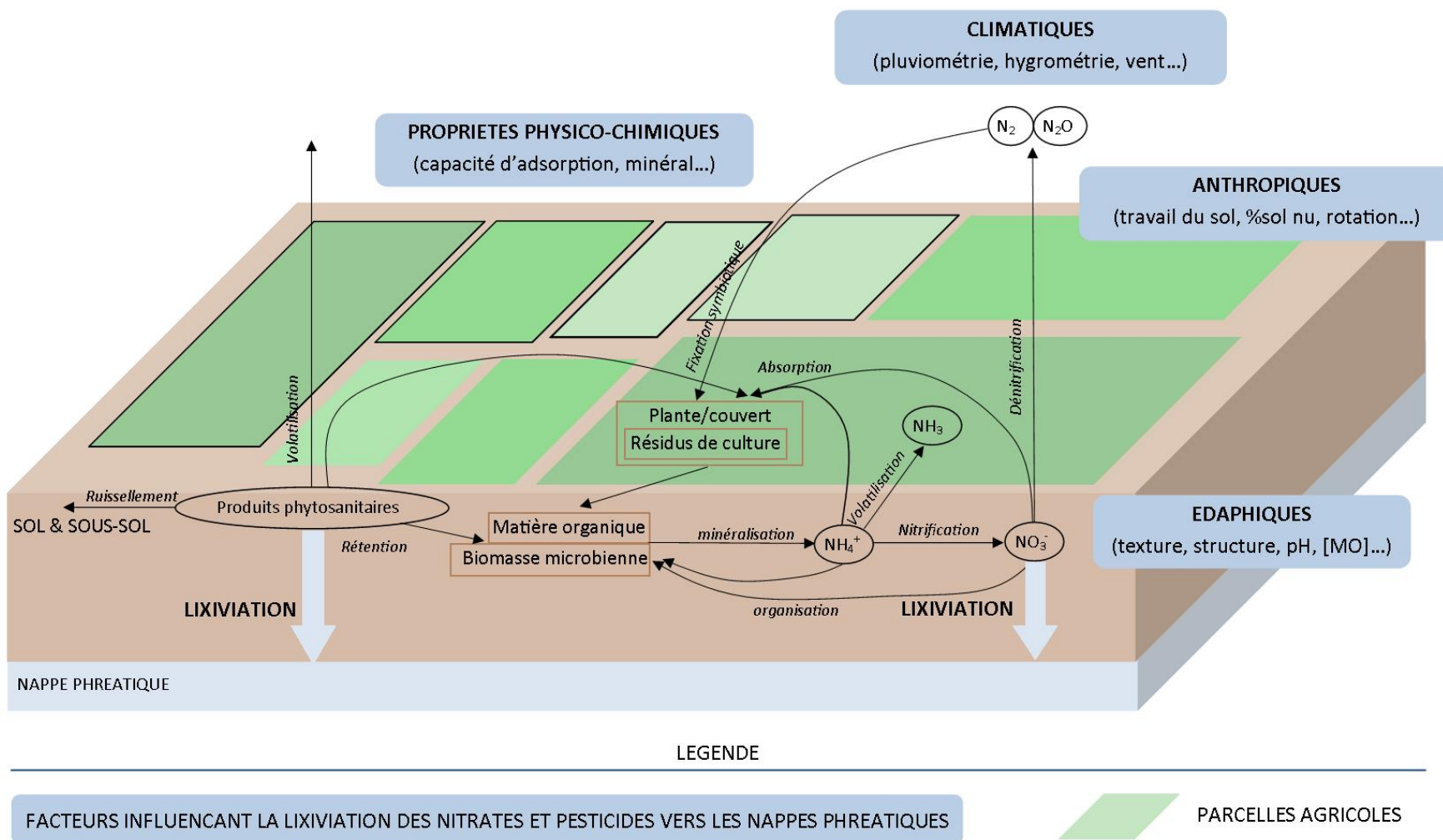


Figure 1. 3: Les différents facteurs qui influencent le phénomène de lixiviation de pesticides et nitrates

- Les **pollutions diffuses** liées à l'épandage de ces matières actives. Elles sont plus difficiles à appréhender car les mécanismes de transfert mis en œuvre sont nombreux et complexes (Chia et al., 1992).

Les pesticides sont appliqués le plus souvent sous la forme de liquides pulvérisés sur les plantes et/ou sur le sol. Dès qu'ils ont atteint ces cibles, les substances sont dégradées ou dispersées dans le sol ou l'air. Elles peuvent être absorbées par des plantes ou des organismes du sol, mais aussi rester dans le sol ou se volatiliser, ruisseler ou être lixiviées (cf. Figure 1.3). Les pertes de pesticides par lixiviation sont généralement observées durant les quelques semaines qui suivent le traitement (Laurent, 2012), et ce phénomène est influencé par les mêmes facteurs que ceux qui influencent la lixiviation des nitrates:

En ce qui concerne **le sol** et ses composantes, la teneur en matière organique est un facteur majeur car les molécules de pesticides sont adsorbées sur ces particules, ce qui limite leur lixiviation vers les eaux souterraines. La texture du sol est directement liée à la capacité d'infiltration de l'eau et l'activité biologique du sol permet la dégradation des substances avant leur lixiviation (van der Werf, 1996).

Les **pratiques agricoles** peuvent avoir des effets directs, via la quantité de pesticides appliquée, mais aussi des effets indirects. Par exemple, un travail du sol, comme il a été dit précédemment, provoque une minéralisation de la matière organique, donc une baisse du phénomène d'adsorption des pesticides et donc de leur rétention dans le sol.

Comme pour les nitrates, les **conditions climatiques** influencent le phénomène de lixiviation des pesticides. Une grande proportion des herbicides, étant appliquée entre l'automne et le début du printemps, ce sont les pesticides les plus présents dans les eaux souterraines, contrairement aux fongicides et insecticides d'utilisation généralement plus printanière.

Concernant les **propriétés physico-chimiques** des pesticides, les molécules à demi-vie courte sont peu lixiviées, de même que celles à forte capacité d'adsorption et donc de rétention par le sol. Les progrès de la recherche ont permis l'apparition de nouvelles molécules plus spécifiques et efficaces à de très faibles doses. En parallèle, une législation de plus en plus stricte envers ces substances actives et les critères de leur homologation dépendent à présent de leurs effets sur la santé, les écosystèmes et l'environnement.

Selon la bibliographie, le phénomène de lixiviation, des pesticides et des nitrates issus de l'activité agricole, est complexe puisqu'il dépend des facteurs du milieu (sol et climat) et des pratiques agricoles. La variabilité pédoclimatique, le choix des cultures et les pratiques associées déterminent l'ampleur des processus en cause et la pression sur la qualité des eaux souterraines.

Concernant les risques de pollution des eaux souterraines, ils dépendent notamment de la vulnérabilité de la nappe, liée au contexte hydrogéologique (perméabilité, épaisseur, profondeur). Par exemple, une nappe captive recouverte d'une formation imperméable (argile) sera peu vulnérable en comparaison d'une nappe libre. Enfin son taux de renouvellement est un facteur déterminant puisqu'un effet de dilution réduit les concentrations en pesticides et en nitrates dans les eaux. L'effet des actions proposées pour reconquérir la qualité des eaux souterraines reste donc incertain en matière d'efficacité, comme en matière de délai de réponse du milieu (Chia et al., 1992; Grizzetti et al., 2011). Néanmoins, la politique de l'eau vise à limiter ce phénomène en proposant d'intervenir directement sur les pratiques agricoles.

1.2 La politique de l'eau en France

1.2.1 Les instruments mis en œuvre par la politique de l'eau

Depuis la première loi sur l'eau en France de 1964, la politique publique française de l'eau a diversifié ses instruments pour améliorer l'accès à l'eau potable et encourager la protection et la reconquête de la qualité des eaux souterraines. La gestion actuelle de l'eau est basée sur la législation française et sur des directives européennes.

La première loi sur l'eau (cf. Figure 1. 4) instaure **une gestion décentralisée au niveau des bassins versants** limités géographiquement par les lignes de partage des eaux entre les grands fleuves français. Ce



Figure 1. 4: Les douze bassins hydrographiques français (source : Assemblée nationale ; rapport d'information n°3425 sur les continuités écologiques aquatiques, janvier 2016)

découpage naturel permet de délimiter douze grands bassins, territoires administratifs de référence de la gestion de l'eau et de ses usages:

- les sept bassins métropolitains : Adour-Garonne, Artois-Picardie, Loire-Bretagne, Rhin-Meuse, Rhône-Méditerranée Corse, Seine-Normandie, et ;
- les cinq bassins d'outre-mer : Guadeloupe, Guyane, Martinique, La Réunion et Mayotte.

Pour gérer ces grands bassins, quatre acteurs majeurs interagissent : le comité de bassin, l'agence de l'eau, le préfet coordonnateur de bassin et une instance nationale, le comité national de l'eau (cf. Encadré 1). Les agences de l'eau **soutiennent financièrement** des projets de protection de la ressource en eau (station de traitement, programme d'actions...) grâce aux **redevances** perçues auprès des usagers et des acteurs

économiques à l'origine des pollutions. De 1960 à 1990, les moyens mis en œuvre pour lutter contre les pollutions des nappes phréatiques s'inscrivent principalement dans une logique curative. Cette politique se matérialise par des investissements pour la réalisation de travaux de réparations et d'aménagements telle que l'installation de stations d'épuration de l'eau et de réseaux d'égouts. **La lutte contre les pollutions diffuses par l'activité agricole est quasi-inexistante sur cette période (Vincent, 2016).**

Au niveau européen, des normes de qualité sont fixées selon les usages de l'eau. La directive eau potable publiée en 1980 (cf. Fig. 5) fixe une valeur maximale en nitrates de 50mg/L et une valeur « guide » (valeur indicative vers laquelle il convient de tendre) de 25 mg/L. Pour les pesticides, la directive fixe une valeur maximale de 0.1 µg/L par substance, et une valeur maximale de 0.5 µg/L pour la somme des **substances** détectées. La France a repris ces valeurs maximales comme normes de qualité à respecter pour que l'eau soit considérée comme potable.

Dans les années 90, les dispositifs de traitement de l'eau ne suffisent plus à garantir le bon état des eaux de consommation. La politique de l'eau adopte alors une logique préventive et s'oriente vers des objectifs de réduction des émissions polluantes. De fait, 1992 est marquée par la création de la directive nitrates (directive 91/676/CEE) qui cible la réduction des pollutions par les nitrates d'origine agricole. Celle-ci repose sur l'identification de **Zones Vulnérables Nitrates (ZVN)** et prévoit un **programme d'actions (PA)** relatif aux « bonnes pratiques agricoles » (*e.g.* gestion de la fertilisation azotée, occupation des terres...) rendues obligatoires pour les agriculteurs cultivant sur ces zones.

Dans les années 2000, devant l'inefficacité des mesures précédentes, la directive 2000/60/CE, dite directive Cadre sur l'Eau (DCE), impose une obligation de résultats avec la définition d'objectifs de « bon état » des milieux aquatiques à atteindre d'ici 2015, 2021 ou au plus tard 2027. Cette directive encourage **la participation des acteurs locaux** à la restauration effective de la qualité des eaux. Elle prévoit une intervention des acteurs de l'eau à toutes les étapes du processus, de l'état des lieux au suivi de la mise en œuvre du dispositif. Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) et le Schéma d'Aménagement et de Gestion de Eaux (SAGE) créés en 1992 (cf. encadré), deviennent l'instrument français de la mise en œuvre de la DCE et déclinent, au niveau des bassins et de la ressource locale, les objectifs à atteindre pour maintenir/restaurer l'état qualitatif et quantitatif des eaux superficielles et souterraines. En 1996, dans le cadre des SDAGE, 2500 captages n'ayant pas atteint le « bon état des eaux souterraines » ont été recensés.

Les gestionnaires de la ressource se trouvent, en tant que **maîtres d'ouvrage**, face au défi d'organiser **une démarche participative** avec les acteurs locaux pour définir et mettre en œuvre les opérations visant à préserver, protéger les ressources en eau et satisfaire les usages. Elle repose sur trois phases :

- la délimitation de **l'aire d'alimentation de captage (AAC)** et la cartographie de sa vulnérabilité intrinsèque ;
- la réalisation d'un Diagnostic Territorial des Pressions, notamment Agricoles, s'exerçant sur l'AAC, et ;
- la Construction d'un plan d'actions, sous la forme d'une liste de mesures ou d'actions de lutte contre les pollutions d'origine agricole.

Dans le cadre du **dispositif réglementaire** des Zones Soumises à Contraintes Environnementales (ZSCE) créé en 2006 (cf. Figure 1. 5), une liste de mesures, sélectionnées au sein du plan d'action, peut être arrêtée par le préfet sous l'appellation **programme d'actions**. Ce dispositif offre la possibilité au préfet coordonnateur de rendre obligatoire tout ou partie du programme d'actions, sur une AAC désignée ZSCE dans un délai d'un an si ces mesures ne sont pas mises en œuvre volontairement, une fois l'arrêté pris. La loi Grenelle 1 aboutit en 2009 à l'identification de 507 captages « prioritaires » et fait l'objet des trois phases réglementaires décrites ci-dessus. Cette liste sera étendue à 1000 captages "prioritaires" par l'adoption des SDAGE 2016-2021.

L'appui des projets en Recherche et Développement compte également comme instrument et fera l'objet de développements ultérieurs

Encadré 1 : Définitions clés utiles à la compréhension des instruments mis en œuvre par la politique de l'eau

Comité de bassin : sorte de parlement de l'eau, il réunit des élus, des représentants de l'administration, des usagers de l'eau, les industriels et les agriculteurs. Il définit la politique et les actions à mener pour répartir la ressource en eau et lutter contre la pollution.

Agence de l'eau : établissement public de l'état, chargée de percevoir les redevances en provenance des usagers de l'eau, associées à la pollution émise de toutes les origines. L'Agence distribue également des aides aux usagers pour l'exécution de travaux de lutte contre la pollution comme les stations de traitement des eaux usées ou de traitement d'eau potable.

Préfet coordonnateur : choisi parmi les préfets de département pour coordonner la politique de l'eau au niveau du bassin.

Comité national de l'eau (CNE) : c'est l'instance du comité de bassin au niveau national. Il donne des avis sur les grandes décisions sur l'eau.

Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) : véritable outil du comité de bassin qui programme toutes les actions à mettre en œuvre sur ce bassin. Il fixe pour six ans les orientations qui permettent d'atteindre les objectifs attendus en matière de "bon état des eaux". Ils sont au nombre de 12, un pour chaque "bassin" de la France métropolitaine et d'outre-mer.

Schéma d'Aménagement et de Gestion de Eaux (SAGE) déclinaison du SDAGE à l'échelle locale. Il vise à concilier la satisfaction et le développement des différents usages (eau potable, industrie, agriculture ...) et la protection des milieux aquatiques, en tenant compte des spécificités d'un territoire. Délimité selon des critères naturels, il concerne un bassin versant hydrographique ou une nappe. Il repose sur une démarche volontaire de concertation avec les acteurs locaux.

Aire d'Alimentation du Captage : surface du territoire contribuant à l'alimentation du captage par l'infiltration directe des eaux ou par l'infiltration de cours d'eau. Cette surface suit généralement la projection de la portion de la nappe qui alimente le captage, mais il peut en différer par ajout ou retrait de zones en surface (Vernoux et al., 2007). Trois périmètres de protection sont distingués autour des captages : **immédiat** (environ 15 m), **rapproché** (environ 50 m) et **éloigné** (ce dernier périmètre n'a pas force obligatoire, il renforce simplement le précédent et peut couvrir une superficie très variable).

Territoire à enjeu eau : correspond à une Aire d'Alimentation de captage (AAC) délimitée par un périmètre où toute goutte d'eau tombée au sol est susceptible de parvenir jusqu'au captage pollué ou à une Zone Vulnérable Nitrates (ZVN). Ce territoire comprend une ou plusieurs communes, affectées par une pollution anthropique en nitrate ou en pesticide.

Mesures Agro-environnementales (MAE) : mesures basées sur des contrats conclus entre les agriculteurs et l'Etat par lesquels les agriculteurs volontaires s'engagent à respecter un cahier des charges (encourageant des évolutions de pratiques et système de culture) en contrepartie d'un paiement compensant leurs coûts additionnels et leur éventuel manque à gagner (Kuhfuss, 2013).

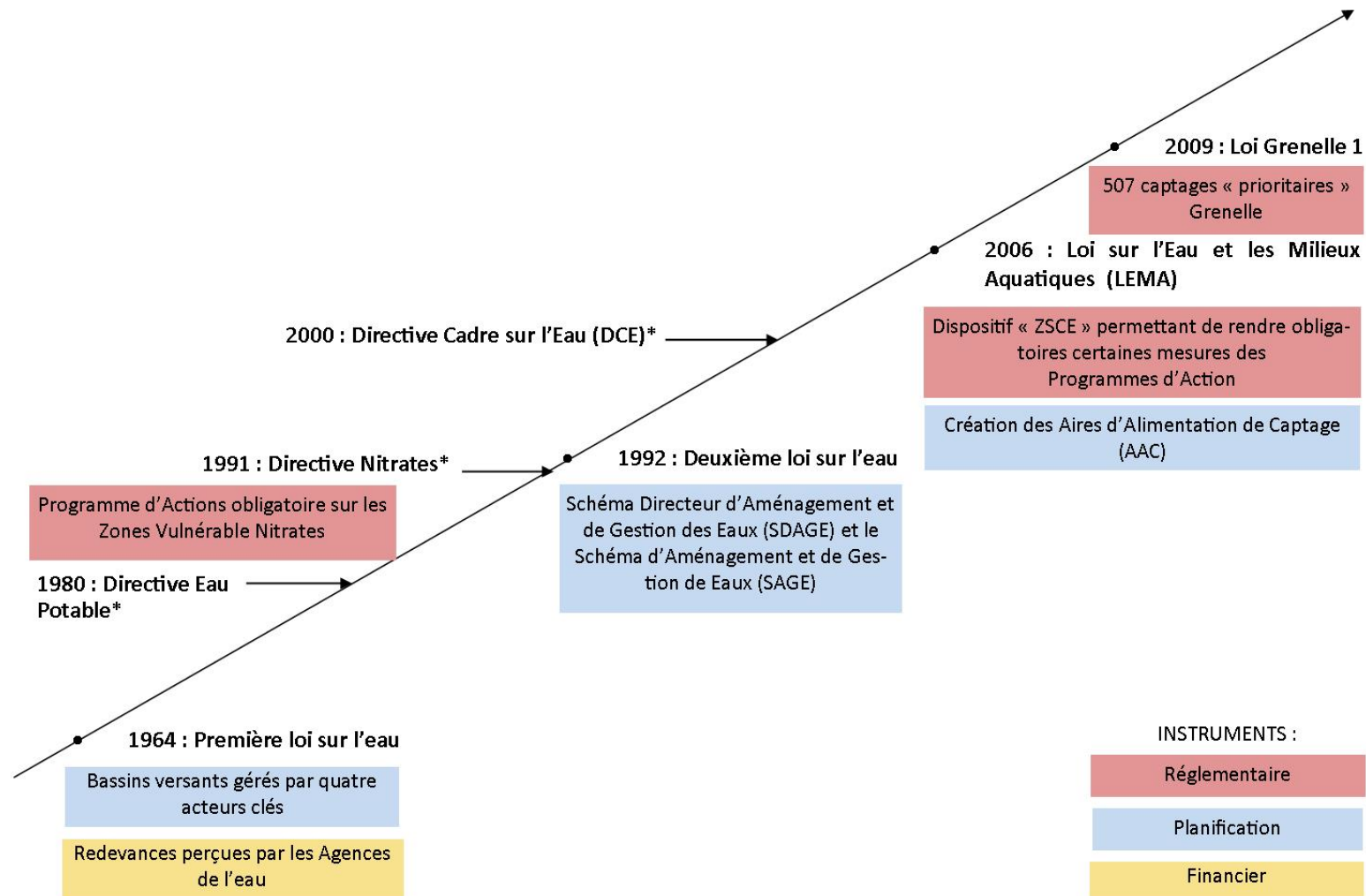


Figure 1. 5 : L'évolution de la politique de l'eau en France (ses 3 lois) et ses instruments visant la limitation des pollutions de l'eau par les nitrates et pesticides (* Directives européennes)

1.2.2 Les recommandations pour protéger et/ou reconquérir la qualité des eaux souterraines

Les mesures dans un programme d'actions peuvent concerner directement les pratiques agricoles, le système agricole, l'aménagement du territoire ainsi que l'accompagnement des agriculteurs (Tableau 1.1).

Tableau 1.1: Description des mesures sur la limitation des pollutions par les nitrates et les pesticides (*mesures présentes dans le Programme d'Action de la Directive Nitrates) (Menard et al., 2014).

Mesures	
AZOTE	Réalisation d'un reliquat azoté en Sortie Hiver*
	Analyse des effluents d'élevage
	Utilisation d'un outil d'aide à la décision
	Interculture longue*
	Doses plafonds (selon la culture et la période)
	Réduction de la fertilisation*
	Interdiction temporaire ou permanente de stockage d'effluents*
	Fractionnement et dates des apports*
	Absence d'apports sur les prairies
	Périodes d'interdiction*
Capacité de stockage*	
PRODUIT PHYTOSANITAIRE	Réduction chiffrée (%) du nombre de doses homologuées (IFT)
	Mise en place de techniques alternatives telles que le désherbage mécanique
	Absence de traitement sur prairies
	Interdiction de désherbage chimique en période hivernale (1 ^{er} novembre – 15 janvier) et respect de la période d'interdiction d'utilisation des herbicides racinaires
Diagnostic du pulvérisateur	
SYSTEME AGRICOLE	Augmentation des surfaces en herbe
	Maintien ou conversion à l'agriculture biologique
	Interdiction de retourner les prairies permanentes
	Introduction d'oléagineux/protéagineux
AMENAGEMENT	Maintien et installation de bandes enherbées*
	Maintien des espaces boisés
	Restauration et entretien de mares et plan d'eau
	Aménagement et entretien des fossés
ACCOMPAGNE- MENT	Démonstrations / rencontres techniques
	Animation/sensibilisation
	Formation sur la gestion de l'azote, produits phytosanitaires ou nouveaux modes de production
	Réseau de parcelles de référence
	Expérimentation de nouvelles techniques (retournement des prairies, interculture...)
Accompagnement individuel : diagnostics d'exploitation	

Concernant les **pratiques agricoles**, les mesures contenues dans un programme d'actions pour lutter contre la pollution diffuse des eaux souterraines par les nitrates peuvent s'appuyer sur différents leviers : (i) le raisonnement de la fertilisation minérale et organique (diminution de la quantité, dose plafond), (ii) les périodes d'interdiction des apports, et (iii) la gestion de l'interculture. Pour lutter contre la pollution diffuse des eaux souterraines par les produits phytosanitaires, les mesures s'appuient sur (i) le raisonnement des traitements, (ii) les périodes d'interdiction des traitements et (iii) l'investissement du

matériel. La réduction de traitements en pesticides qui s'identifie par le calcul de l'Indice de Fréquence de Traitement (IFT), est souvent adossée aux dispositifs financiers existants comme les Mesures Agro-Environnementales (MAE) (cf. encadré 1) (Menard et al., 2014).

Pour **des changements vers des systèmes économes en intrants** de synthèse (apports de fertilisants et produits phytosanitaires), les mesures concernent la conversion et le maintien de l'agriculture biologique, l'extension ou le maintien des surfaces en herbe et la diversification de l'assolement (cf. Tableau 1.1). Aucune mesure ne concerne les associations d'espèces ou de variétés (Menard et al., 2014), qui sont pourtant des solutions pertinentes pour diminuer le recours aux pesticides et aux engrais.

Certaines mesures peuvent néanmoins jouer un rôle de régulation des ravageurs des cultures, par un allongement des rotations, un **aménagement paysager** et par une évolution de la gestion du foncier. Il s'agit du maintien d'espaces boisés, de la mise en place ou de l'entretien des haies et bandes enherbées et/ou fleuries, du « stockage de parcelles » (l'achat de parcelles extérieures de la zone à protéger pour pouvoir les échanger avec des parcelles vulnérables présentes dans l'aire) (cf. Tableau 1.1).

L'application de ces mesures, potentiellement incluses dans un programme d'actions, nécessite un accompagnement des agriculteurs, collectif via la formation ou via l'expérimentation ou individuel via un diagnostic agricole.

Les mesures réglementaires retenues dans un programme d'actions sont majoritairement celles permettant des réductions de flux de polluants (nitrates et produits phytosanitaires), plus rarement celles relevant davantage du ressort de l'aménagement du paysage et de l'accompagnement des acteurs (Menard, 2014). Suite à la description du contenu des mesures, il est pertinent de s'intéresser à leur efficacité pour la reconquête et la protection de la qualité des eaux souterraines, question traitée par de nombreux travaux de recherche.

1.2.3 *Évolution de la pollution des eaux souterraines en France et raisons de l'efficacité partielle des recommandations pour protéger et/ou reconquérir la qualité des eaux souterraines*

En France, près de 34 000 ouvrages de prélèvement produisent environ 18 millions de mètres cube d'eau potable par jour destinée à la consommation humaine. Le nombre de captages utilisés à cet effet évolue légèrement chaque année en fonction de la mise en service de nouveaux captages, de l'interconnexion entre des unités de distribution ou de l'abandon d'ouvrages. Entre 1994 et 2015, 38% des 8.627 captages abandonnés l'ont été à cause de leurs concentrations élevées en nitrates ou pesticides⁸. On peut observer que la cause principale d'abandon de captages est la qualité de la ressource (cas de 62 départements).

Après une augmentation entre 1994 et 2000, puis une stabilisation jusqu'en 2008, le nombre de captages abandonnés est de nouveau en hausse depuis 2009 (Commissariat général du développement durable, 2016). Ce constat est le résultat de différentes causes énumérées et explicitées ci-dessous.

⁸ <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/indicateurs-indices/f/2486/0/nombre-captages-leau-potable-fermes.html>

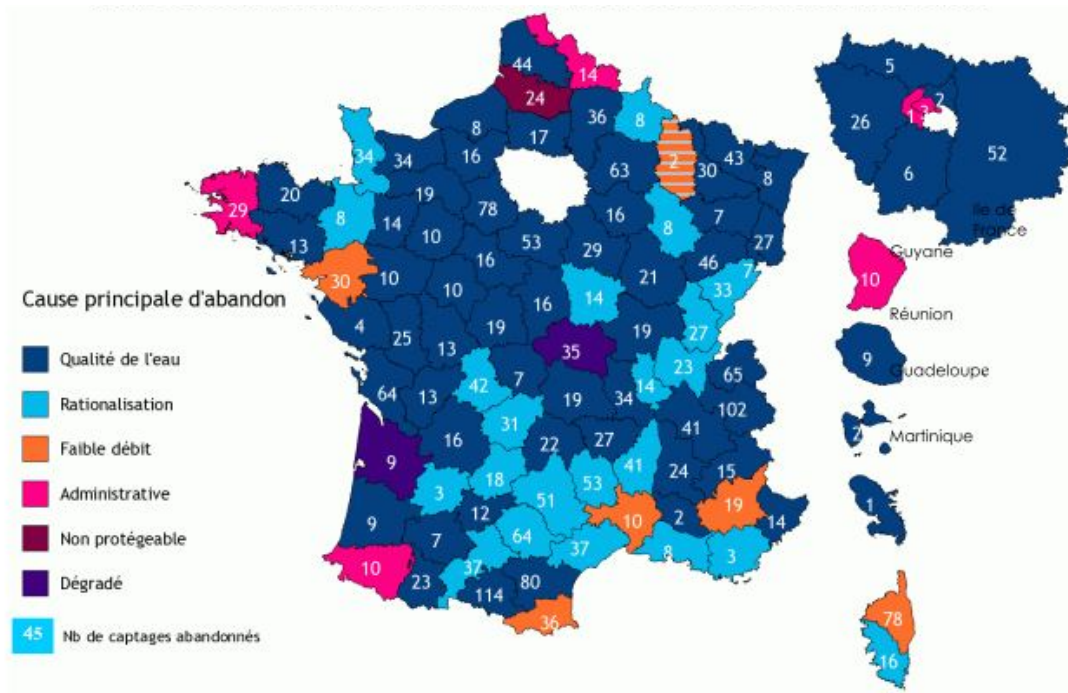


Figure 1. 6: Cause principale et nombre d'abandons correspondant par département (source : Ministère de la santé – ARS – SISE-Eaux, 2012)

1. *La lenteur et le coût de la démarche pour établir un programme d'action*

En premier lieu, la démarche d'élaboration des programmes d'action pour la reconquête de la qualité des eaux souterraines est remise en question (Barataud, 2014; Bénézit et al., 2014; Bosc and Doussan, 2009; Brun, 2003; Liefferink et al., 2011; Menard et al., 2014). Suite à la mise en œuvre de la DCE, le paysage institutionnel et financier, présenté en amont, s'est retrouvé directement sous influence d'un ensemble de réformes entraînant une confusion entre acteurs de l'eau (Ghiotti, 2010). De même, l'importance numérique des acteurs institutionnels et les coûts impliqués dans la mise en œuvre des mesures des programmes d'actions entraînent une lenteur de la démarche d'élaboration des programmes d'actions à l'échelle locale (Brun, 2003; Kallis and Butler, 2001).

2. *L'approche délimitée à un territoire à enjeu eau*

L'approche délimitée à un territoire, dont les limites sont hydrogéologiques (cas de la délimitation des AAC), peut conduire à un écart entre l'élaboration des mesures, leur mise en œuvre, et leur efficacité vis-à-vis de la reconquête de la qualité des eaux souterraines (Liefferink et al., 2011). Écrites pour être appliquées sur l'ensemble de l'AAC, elles ne prennent pas en compte la nature du sol qui intervient directement sur les risques de lixiviation (Comte et al., 2006). C'est pourquoi il est intéressant de proposer des mesures appliquées aux différentes natures de sol rencontrées. La combinaison de la remise en herbe des parcelles sur sols sableux ou sur les parcelles en zone rapprochée du captage (cf. encadré) et d'une réduction de la fertilisation des cultures en amont de ces périmètres, peut être un changement pertinent pour reconquérir la qualité des eaux souterraines (Comte et al., 2006). Tel que démontré précédemment, la contamination des eaux souterraines est issue de la combinaison de la **pression sur le territoire** avec la **vulnérabilité intrinsèque de la nappe souterraine**. Les mesures doivent être adaptées, au cas par cas, en fonction de la vulnérabilité du milieu.

Cette approche pose un autre problème : elle vise une délimitation du territoire « éligible ». Elle a des effets d'exclusion qui n'intègrent pas les dynamiques de filières qui se jouent à l'échelle d'un territoire, souvent plus large que l'AAC (Kuhfuss, 2013). Par exemple, Gaigné, (2012) démontre qu'il est nécessaire d'inclure les industriels des filières animales pour diminuer la densité animale sur un territoire. Cela représente un levier potentiellement efficace pour réduire la pression en nitrates d'origine organique.

3. *La standardisation des mesures*

Une fois le programme d'actions établi, les mesures retenues relèvent majoritairement d'un ensemble d'actions concourant à limiter l'utilisation des pesticides et fertilisants azotés sans prendre en compte la diversité des systèmes agricoles sur le territoire (Barataud et al., 2014b; Brun, 2003; Chantre et al., 2012; Menard et al., 2014). L'avantage est l'accessibilité des cahiers des charges de ces mesures à un grand nombre d'agriculteurs, mais qui parfois n'entraînent pas de changement auprès des agriculteurs (OCDE, 2003). Pour la gestion de la ressource en eaux souterraines, il est nécessaire de prioriser des mesures dans un programme d'action afin d'être plus spécifique et de prévoir un suivi à long terme de leur mise en œuvre par les agriculteurs (Barnes et al., 2009; Hering et al., 2010).

Les mesures sont donc à décliner au niveau local, en fonction des objectifs environnementaux, et au cas par cas en fonction de la contribution des exploitations agricoles au risque de pollution.

4. *L'incohérence agronomique des mesures*

D'après Deneufbourg et al.,(2010), la mesure phare de la DN, le plan de fumure, ne présente pas toujours de cohérence agronomique. Elle peut entraîner une baisse significative du rendement dépendant de la culture et de son précédent cultural, et de l'analyse de sol associée au plan de fumure (analyse qui permet d'ajuster le plan de fumure avec les reliquats azotés présents dans la zone racinaire). Par exemple, le plan de fumure peut, s'il est réalisé trop tôt dans la saison, conduire à surestimer les quantités d'azote à apporter par sous-estimation de la minéralisation, à l'origine de l'azote minéral assimilable par la plante (cf. Figure 1.3) (Deneufbourg et al., 2010a). Enfin, certaines mesures peuvent présenter une liste normative de cultures à introduire dans les rotations afin de réduire l'utilisation d'intrants, qui peuvent exclure des cultures ne faisant quasiment pas l'objet de traitements phytosanitaires hors herbicides (Kuhfuss et al., 2012). Par exemple, certaines cultures (maïs, tournesol, prairies temporaires et jachères) ne peuvent être présentes sur les surfaces engagées dans une MAE que dans la limite d'une proportion de 30% des surfaces engagées, alors qu'il s'agit de cultures pouvant ne faire quasiment pas l'objet de traitements phytosanitaires hors herbicides (Kuhfuss et al., 2012).

Ainsi, les mesures proposées dans un programme d'actions doivent prendre en compte la réalité agronomique des agriculteurs soumis aux contraintes réglementaires (Soulard, 2005).

5. *L'opinion négative des agriculteurs vis-à-vis de l'efficacité des mesures et leur sensibilité face aux enjeux environnementaux*

Les agriculteurs ont majoritairement une opinion négative à propos de la DN, ils ne croient pas aux bénéfices environnementaux liés à l'application de ces mesures (Barnes et al., 2009; Buckley, 2012). De façon générale, les agriculteurs se sentent peu concernés par la pollution des eaux souterraines même après la mise en œuvre des mesures obligatoires, car les impacts sur les phénomènes de lixiviation ne peuvent pas s'observer directement (Larrue, 1992; Macgregor and Warren, 2006). Par ailleurs, malgré l'application obligatoire de ces mesures, les bénéfices environnementaux sont souvent moindres que ceux

attendus, car les agriculteurs affirment qu'ils gèrent déjà de façon optimale leur fertilisation et les efforts à mettre en œuvre pour appliquer ces mesures sont faibles et donc pas optimaux (Macgregor and Warren, 2006).

6. *La faible adoption des mesures volontaires*

Le comportement des agriculteurs face à la protection de l'environnement peut expliquer la faible adoption des mesures. Leur impact économique peut aussi être une cause, car l'application de certaines mesures aurait un impact significatif sur les produits d'exploitation via une baisse des rendements (Oenema et al., 2009). Par ailleurs, certaines mesures performantes pour reconquérir la qualité des eaux souterraines, comme la conversion des terres arables en pâturage, entraînent des coûts pour les agriculteurs, plus importants que d'autres mesures (Fezzi et al., 2010), qui ne sont pas toujours compensés financièrement. Enfin, bien que certaines mesures puissent être appuyées par des outils financiers comme les MAE, la faible incitation monétaire contribue à ne pas endiguer le phénomène de faible adoption (Kuhfuss et al., 2012).

Parmi les raisons de l'efficacité partielle de la politique de l'eau en France, nous supposons que la généralisation des mesures, quel que soit le type d'exploitation agricole, est impossible car elle ne prend pas en compte le fonctionnement des exploitations agricoles présents sur les zones à enjeu eau. En effet, on suppose que si les mesures ne sont pas en adéquation avec le fonctionnement des exploitations, alors elles peuvent ne pas être implémentées ou bien être mal implémentées et de ce fait partiellement efficaces, ou enfin être abandonnées dès que possible (changement/arrêt de la réglementation) et donc inefficaces dans la durée. Pour vérifier ces hypothèses, la première partie de cette thèse porte d'une part sur **l'analyse de la diversité de mise en œuvre** par les agriculteurs des mesures réglementaires de la politique de l'eau et d'autre part de leur **adéquation avec le fonctionnement de ces exploitations agricoles**.

Dans ce contexte, le défi en recherche et développement est double. Premièrement, il s'agit de contrebalancer la standardisation et la généralisation des recommandations issues de la Politique de l'eau en portant sur la **conception de scénarios adaptés** aux contraintes agronomiques. Deuxièmement, il s'agit **d'accompagner le nécessaire changement à long terme** des agriculteurs vers des systèmes plus respectueux de la qualité des eaux souterraines.

2. PROTEGER ET/OU RECONQUERIR LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES : QUELLE ECHELLE D'APPROCHE ?

2.1 Les différents instruments misent en œuvre pour permettre la reconquête et/ou protection de la qualité des eaux souterraines

On ne prétend pas ici couvrir une exhaustivité de cas, mais plutôt illustrer différentes approches développées afin de répondre à une problématique liée à la pollution des eaux souterraines d'origine agricole (cf. Tableau 1.2). Il s'agit ici, en les mettant en regard, d'illustrer les principales stratégies mises en place pour lutter contre les pollutions diffuses agricoles. Cette problématique est commune dans les différents pays, et certains acteurs développent des leviers, qui peuvent se combiner entre eux, afin de favoriser le changement des pratiques agricoles à long terme comme (i) les **aides incitatives**, (ii) le développement d'une **filière territoriale**, (iii) **l'acquisition foncière**, et enfin (v) un **accompagnement individuel** (cf. Tableau 1.2). Les scénarios peuvent être identiques comme par exemple la conversion en agriculture biologique sur tout ou partie de la surface du territoire. On le retrouve dans les cas de l'AAC d'Évian, de Lons-le-Saunier, de Munich en Allemagne et dans trois AAC situées dans les régions Centre, Nord-Pas de Calais et Haute Normandie. Les leviers mobilisés sont néanmoins différents.

Pour préserver la qualité de l'eau minérale d'Évian, l'Association pour la Protection de l'Impluvium de l'Eau Minérale d'Évian (APEME) a défini et financé des aménagements et pratiques. Les agriculteurs perçoivent des subventions afin de ne plus utiliser de produits phytosanitaires et privilégier la lutte biologique. Les bâtiments d'élevage sont mis aux normes (couverture des fumiers, imperméabilisation des plates-formes) et les méthodes de fertilisation sont mieux étudiées et contrôlées (Boulier, 2011). La municipalité de Munich (Allemagne) a également décidé d'encourager l'agriculture biologique à travers des aides de l'État (Barataud et al., 2014a). Dans le cas de Lons-les-Saunier, les agriculteurs sont encouragés à la conversion en agriculture biologique par le biais d'aides mais aussi par le développement d'une filière locale avec les établissements collectifs qui sont approvisionnés par ces produits biologiques (Allain, 2013; Barataud et al., 2016).

En Ecosse, un programme incitatif pour des bonnes pratiques lié à un accompagnement individuel avec experts pour la qualité des eaux souterraines a été mis en place depuis 2015 sur six AAC et basé sur des financements personnels (Scottish Water, 2012). Les bonnes pratiques peuvent être la substitution de produits moins impactants pour la qualité des eaux souterraines, de suivre un plan de fumure lié aux analyses de sol, de changer de buses pour épandre les pesticides. De façon similaire, en Angleterre, un programme a été lancé en 2009 afin d'avoir un suivi individuel des exploitations agricoles par des experts et une proposition de mesures adaptées et issues d'un inventaire de mesures permettant de protéger la qualité des eaux souterraines (Catchment Sensitive Farming Evidence Team, 2011). Une étude auprès des agriculteurs suite à la mise en place de ce programme a montré que les agriculteurs étaient satisfaits et appréciaient la relation de face-à-face qu'ils avaient avec le conseiller. 58% des agriculteurs ayant reçus un conseil individuel ont mis en œuvre toutes les mesures qui leur ont été proposées. Cette approche individuelle à l'échelle de l'exploitation agricole semble donc réussie, et a le potentiel de reconquérir la qualité des eaux souterraines en Angleterre si ce programme est accompagné de subventions (Kay et al., 2012).

Tableau 1.2: Principales caractéristiques de cas d'études européens pour protéger la qualité des eaux souterraines. La sélection de ces cas d'étude s'est faite de manière à ce qu'ils illustrent les échelles auxquelles sont conçus les scénarios et les différents outils et méthodes mis en place pour favoriser le changement des pratiques agricoles sur un territoire à enjeu eau

Territoires et ENJEU	Références	Cadre de la démarche	Échelle des scénarios et description	Outils et méthodes d'appui de mises en œuvre
Munich (Allemagne) NITRATES	(Barataud et al., 2014a)	Réglementaire	Territoire et exploitation agricole Conversion en agriculture biologique des agriculteurs sur le territoire	Aides incitatives
Evian (74) NITRATES et PESTICIDES	(Boulier, 2011)	Réglementaire	Territoire et exploitation agricole Conversion en agriculture biologique, bâtiments d'élevages mis aux normes (couverture des fumiers, imperméabilisation des plates-formes) et méthodes de fertilisation mieux étudiées et contrôlées.	Aides incitatives
Lons Les Saunier (39) PESTICIDES	(Allain, 2013; Barataud et al., 2016).	Réglementaire	Territoire et exploitation agricole Conversion en agriculture biologique des agriculteurs du territoire à enjeu eau	Filières territoriales et aides incitatives
Vittel (88) PESTICIDES	(Boulier, 2011)	Réglementaire	Territoire et exploitation agricole Suppression de la culture de maïs, compostage des déjections animales, chargement limité à 1 UGB/ha de surface fourragère, interdiction d'utilisation des produits phytosanitaires, fertilisation azotée raisonnée, en priorité avec les déjections compostées,	Acquisition foncière
AAC 'River Ugie' (Ecosse) NITRATES et PESTICIDES	(Scottish Water, 2012).	Réglementaire	Exploitation agricole Plan de fumure, analyse de sol, test des épandeurs, Substitution des pesticides (ex : Substitution du Métaldéhyde avec le Phosphate de fer), installation de buses antidérive.	Appui individuel avec experts et Aides incitatives
Angleterre NITRATES et PESTICIDES	(Catchment Sensitive Farming Evidence Team, 2011; Kay et al., 2012)	Réglementaire	Exploitation agricole Réduire le chargement UGB quand le sol est humide, mettre des barrières le long des rivières pour l'élevage, construire des ponts pour la traversée des rivières du troupeau, installer des bandes enherbées ...	Appui individuel avec experts et Aides incitatives
Brienon-sur-Armaçon (89) NITRATES PESTICIDES	(Paravano et al., 2016; Reau et al., 2012)	Recherche et Développement	Système de culture Insertion de couverts d'interculture longue et de cultures de printemps dans la rotation	Animation territoriale, (participatif)
Rio Mannu (Sardaigne, Italie) NITRATES	(De Girolamo and Lo Porto, 2012)	Recherche et Développement	Territoire et système de culture Réduction de l'utilisation des fertilisants, et implémentation du colza dans une monoculture de blé	Animation territoriale et modélisation
France NITRATES et= PESTICIDES	(Chantre et al., 2016; Gisclard et al., 2015)	Recherche et Développement	Territoire et système de culture Spatialisation sur l'AAC des scénarios « économes » et en agriculture biologique	Animation territoriale et modélisation

Les recommandations sur le réajustement des pratiques, pour diminuer les pollutions en nitrates et pesticides, ne sauraient garantir, à elles seules, une réduction significative de la contamination. De fait, certaines démarches réglementaires mettent en œuvre des leviers divers pour accompagner le changement par les agriculteurs. Dans cette même logique, des démarches participatives en recherche et développement se sont développées s'appuyant sur l'implication des agriculteurs situés sur ces territoires pour proposer des solutions adaptées localement.

2.2 Les outils pour concevoir des scénarios

Afin de comprendre le challenge auquel doit répondre la recherche et le développement, il est nécessaire de définir ce qu'est un scénario et dresser un bilan des méthodes développées pour le concevoir. « Un **scénario** décrit de manière cohérente et logique l'état futur possible, probable ou désiré d'un système. Il peut inclure non seulement l'**état futur** du système et **son impact**, mais également la situation initiale du système, son **évolution** et les **forces** qui ont provoqué cette évolution. Le scénario peut être construit en commençant par l'état initial ou final du système. Sa description peut être qualitative ou quantitative » (Clavel, 2010).

De cette définition, on peut distinguer **trois phases** dans la démarche de conception proposée par Loyce and Wery (2006). La première phase correspond au **diagnostic de l'état initial**, permettant de fixer des contraintes et objectifs pour la conception. La deuxième phase est la réalisation de l'état final, qui correspond à l'**étape de conception**. Cette étape peut se faire grâce à plusieurs outils de conception, présentés par la suite. Enfin, la troisième phase est l'**évaluation de l'impact** de l'état futur, de l'évolution entre l'état initial et l'état final ou des leviers qui ont provoqué cette évolution. Il s'agit d'une étape majeure du processus de conception et diffusion des scénarios conçus (Meynard and Savini, 2003). Cette évaluation peut être réalisée :

- *A priori/ex ante* lors d'une démarche de conception permettant de trier les scénarios et de ne soumettre à l'expérimentation que les plus prometteurs (Sadok et al., 2007)
- *A posteriori*, au terme d'une mise en situation expérimentale, en station expérimentale ou en parcelle d'agriculteur, de manière isolée ou en réseau, pendant un ou plusieurs cycles de rotation (Béguin and Cerf, 2004).

La **conception** peut donc être définie comme un **processus actif**, intentionnel, qui vise à générer simultanément des concepts et des connaissances qui déboucheront éventuellement sur de nouveaux produits et de nouvelles technologies (des scénarios mis en œuvre) (Meynard et al., 2006). On y distingue la **conception pas-à-pas** qui consiste à améliorer l'existant en intégrant progressivement des innovations propices aux apprentissages lors du changement, et la **conception de novo** qui cherche à s'abstraire des contraintes existantes et ouvre le champ des possibles, permettant de concevoir des scénarios de rupture (Meynard, 2012). Face à l'objectif de reconquête et de protection de la qualité des eaux souterraines, les deux approches peuvent a priori convenir. En effet, comme nous l'avons démontré en amont, un **réajustement des pratiques** dans une exploitation agricole peut être tout aussi efficace vis-à-vis de la pression de la qualité des eaux souterraines qu'un **changement profond du système de production** dans une autre exploitation.

Pour concevoir des scénarios, **trois grands types d'outils** sont utilisés : l'expérimentation de terrain (en station de recherche ou chez des agriculteurs), la modélisation informatique, et des outils facilitant le dialogue et renforçant les capacités des acteurs (formation, apprentissage, aide à la décision) (Novak, 2008).

2.2.1 Concevoir à partir de l'expérimentation

La méthode basée sur des expérimentations de terrain se réfère à la méthode formalisée par Vereijken (1997) pour concevoir des systèmes de production innovants à l'échelle de l'exploitation. Cette **méthode de prototypage** est une démarche en cinq étapes :

1. Une hiérarchie des objectifs assignés au nouveau système, basée sur un diagnostic des avantages et des inconvénients des systèmes actuels,
2. La quantification des différents résultats à atteindre par le système pour satisfaire les principaux objectifs ci-dessus,
3. La conception, proprement dite, d'un prototype théorique sous forme d'un schéma reliant les paramètres à atteindre et les méthodes à utiliser,
4. Une adaptation locale et un test au champ
5. La diffusion de ce système via des groupes pilotes d'agriculteurs

Seulement, les éléments du prototype théorique issus d'un consensus entre chercheurs et experts ne prennent pas ou peu les variabilités pédologiques et climatiques et les risques associés. Pour pallier cette difficulté, plusieurs chercheurs ont utilisé des **modèles** simples simulant les phénomènes de variabilité pédoclimatique, comme le rendement du coton sous contrainte hydrique (Lançon et al., 2004) et les risques d'érosion et maintien de la matière organique des sols (Dogliotti et al., 2005).

2.2.2 Concevoir à partir de modèle, méthode *in silico*

D'autres méthodes de conception accordent une place majeure aux modèles numériques et sont qualifiées de '*in silico*'. Pour ces méthodes, les phases 2 et 3 (conception et évaluation) de la démarche de conception sont le plus souvent confondues. Les modèles permettent de planifier et **orienter les décisions stratégiques sur le scénario**, piloter, évaluer et prédire les évolutions des scénarios et parfois favoriser les apprentissages individuels et collectifs (Jeuffroy et al., 2008a). Le modèle joue donc un moyen efficace pour faire de la conception *de novo*. Ils permettent de dépasser les connaissances d'experts et de prédire les effets à long terme.

La complexité des connaissances à prendre en compte pour construire ces modèles répondant à des enjeux multiples exige de mobiliser des compétences et des disciplines beaucoup plus variées, difficilement mobilisables par une personne seule (Lançon et al., 2008). Pour pallier à cette difficulté, les outils de renforcement de la capacité des acteurs (cf. § 2.1.3) à participer au processus de conception sont proposés.

2.2.3 Concevoir par le renforcement de la capacité des acteurs

Les outils facilitant le dialogue et renforçant les capacités des acteurs ont été développés en premier lieu dans les sciences sociales appliquées par exemple à l'éducation, la médecine puis étendues notamment à

l'agronomie, tous les domaines où **les changements des pratiques** sont des objectifs prioritaires. **Les sciences participatives** sont aujourd'hui définies comme « les formes de production de connaissances scientifiques auxquelles des acteurs non-scientifiques-professionnels, qu'il s'agisse d'individus ou de groupes, participent de façon active et délibérée » et « visent à produire des connaissances actionnables dans une perspective d'innovation et de transformations sociales ».

Comme le soulignent Hatchuel et al. (2009), l'innovation est un **processus collectif** et interactif sur la base de sources multiples, composé d'allers et retours fréquents. La théorie C-K en particulier, définit la conception comme un processus actif et intentionnel qui vise à générer simultanément des concepts (C) et des connaissances (K) qui déboucheront sur des nouveaux produits. L'exploitation des connaissances existantes locales et la production de nouvelles connaissances par la confrontation ou même l'**hybridation** de connaissances génériques sont des aspects importants dans **les processus exploratoires de scénarios** (Berthet et al., 2015; Prost et al., 2017). Cette exploration est rendue possible grâce à la participation des acteurs locaux qui peuvent prendre plusieurs formes et qui seront présentés par la suite.

Ces trois outils ont donc tous été développés pour pallier à certaines difficultés rencontrées lors de la conception de scénarios. Ils sont complémentaires et leur combinaison peut aboutir à de nouvelles méthodes de conception. Le programme australien de recherche-action participative, FARMSCAPE (Farmers', Advisers', Researchers', Monitoring, Simulation, Communication and Performance Evaluation) est souvent un cas type mentionné pour avoir combiné ces divers outils (Carberry et al., 2002); Leur combinaison a permis de renforcer les capacités d'apprentissage des agriculteurs en leur permettant, d'une part, d'acquérir une expérience sur leur système en testant différents scénarios in silico donc « sans risque », et d'autre part de comprendre plus finement les causes d'un résultat, en les faisant réfléchir sur les répercussions de leur mode de conduite (Novak, 2008).

2.3 Les scénarios issus de la recherche et développement pour reconquérir et/ou protéger la qualité des eaux souterraines

2.3.1 Des solutions techniques issues de la Recherche et Développement

Du lien fait entre la pollution des eaux souterraines et l'activité agricole (Hénin, 1980) les premiers travaux sur les pollutions des eaux d'origine agricole portent principalement sur les pratiques agricoles et ciblent l'échelle parcellaire. Ainsi les travaux de Recherche et Développement ont mis en œuvre des solutions techniques conduisant à réduire l'utilisation d'intrants tout en limitant les pertes de production.

Concernant la pollution nitrique, les solutions techniques ont porté sur **une meilleure gestion des intrants azotés** (quantité et dates) associée à la **mise en place d'interculture** (Lacroix, 1995). La méthode du bilan azoté a été développée pour ajuster au mieux la dose d'engrais azoté par apport aux besoins de la culture (Hébert, 1969). Elle repose sur des principes suivants : une nutrition azotée non limitante tout au long du cycle et l'estimation de manière indépendante des différents termes de l'équation du bilan pur caractérisaient la fourniture du sol et les besoins en azote. Or ces principes sont actuellement remis en cause (Ravier, 2017). En effet, il a été démontré que le blé, sur lequel ont porté les premiers bilans azotés, peut tolérer des carences en azote qui doivent être décroissantes au cours du cycle. Cette période de

carence en azote peut rendre possible l'absorption de l'azote minéral du sol par la plante avant l'apport des fertilisants (Ravier et al., 2017, 2016).

Par ailleurs, dans la majeure partie des cas, **l'ajustement de la fertilisation azotée** ne suffit pas pour réduire les pertes par lixiviation. La variabilité des conditions climatiques en est une cause, qui peut être atténuée par le fractionnement des apports (Fageria and Baligar, 2005; Zebarth et al., 2009). Cette pratique de fractionnement permet de réaliser des apports en fonction du stade de développement et des besoins des plantes, ce que préconise cette nouvelle approche de bilan azoté (Ravier et al., 2016). Ces apports se font majoritairement au printemps. Or, **les risques de lixiviation des nitrates sont les plus importants à l'automne**, pendant les fortes précipitations automnales et la minéralisation des résidus de culture. En effet, la minéralisation d'automne est un processus naturel, quantitativement important, indépendant de la fertilisation de la culture précédente (Mary et al., 1992). L'enfouissement des résidus de culture, par leur *organisation*, permet de piéger en partie l'azote minéral disponible, tout comme l'enfouissement des cultures intermédiaires. Les produits de leur décomposition se trouvent ensuite assimilés par la flore microbienne du sol, et donc stockés sous forme organique non lixiviable, qui se minéralisera au cours des années (Mary, 1992).

Concernant les pesticides, les solutions techniques présentées dans le tableau ci-dessous (cf. Tableau 1.3) rassemblent de manière non exhaustive les solutions techniques pour réduire la dispersion des pesticides dans l'environnement et raisonner leurs utilisations. Il est possible de réduire les transferts des pesticides par des aménagements (zone tampon, bande enherbée) qui visent à éviter ruissellement et lixiviation des matières actives, en leur laissant le temps de se dégrader. Afin de réduire leurs utilisations, Doré et al. (2006) identifient (i) les **méthodes biologiques** (utilisation des auxiliaires de culture...); (ii) les **méthodes physiques** (lutte mécanique comme le binage contre les adventices...); (iii) les **méthodes génétiques** (variétés résistantes...) et (iv) les **méthodes culturelles** (date et densité de semis...) comme alternatives aux pesticides. Le bilan environnemental de ces pratiques peut parfois être négatif selon les effets induits. La mise en place de bandes enherbées en vignes par exemple, permet d'améliorer la fonction de filtre du sol mais sa destruction peut entraîner l'utilisation d'herbicides plus importante que si le sol était resté nu (Aubertot et al., 2007).

Tableau 1.3 : présentation des recommandations de pratiques agricoles pour diminuer la pollution des pesticides des eaux souterraines (Aubertot et al., 2007)

Objectifs	Recommandations de réajustement des pratiques
Adapter les usages de pesticides aux conditions du milieu	Choisir le produit le plus adapté Cibler, améliorer l'efficacité du traitement
Réduire les pertes à l'application	Améliorer les propriétés des préparations des substances actives Améliorer les techniques d'épandage Respecter les conditions d'application limitant les pertes
Réduire les transferts dans et hors de la parcelle	Maintien d'un couvert végétal Apports d'amendements organiques pour augmenter le taux de matière organique et diminuer la disponibilité des pesticides Travail du sol et techniques associées en culture annuelles
Raisonner l'utilisation des pesticides	Réduction de la fréquence de traitements (IFT) Réduction des doses appliquées par unité de surface (bas volume) Respecter les conditions climatiques des traitements

Réduire le recours aux pesticides	Utiliser la résistance des cultures aux bio-agresseurs avec l'amélioration variétale (Ryan et al., 2009; Tilman et al., 2006) La lutte biologique avec l'agent prédateur (Altieri and Nicholls, 2004; Gurr et al., 2003; Khan and Pickett, 2004) La lutte biotechnique avec la confusion sexuelle La lutte physique avec la lutte mécanique contre les adventices Le mélange de variétés ou de cultures
-----------------------------------	---

L'efficacité des solutions techniques mentionnées pour protéger la qualité des eaux souterraines reste néanmoins posée. Le phénomène de lixiviation des pesticides et nitrates est le résultat d'une interaction entre plusieurs facteurs (cf. § 1.1.4). Si ce phénomène est bien connu, l'impact quantifié de ces solutions techniques reste impossible, mis à part quelques situations expérimentales lourdement instrumentées (Deneufbourg et al., 2010a; Fonder et al., 2010; Martínez et al., 1990). La **limitation de l'utilisation des pesticides et intrants azotés** paraît donc **indispensable** si l'on vise une réduction significative de la contamination des milieux.

2.3.2 La conception innovante de système de culture

La recherche agronomique vise aujourd'hui à identifier des pratiques agricoles basées sur la valorisation des régulations naturelles, dans le cadre de **l'agroécologie** (Kremen et al., 2012; Rosset and Martínez-Torres, 2012; Wezel et al., 2011) (Encadré 1). Ce nouveau paradigme implique une approche où l'on prend en compte les interactions entre techniques et leur effets indirects (Meynard, 2017). La prise en compte des **interactions entre techniques agricoles** conduit à changer d'échelle temporelle et spatiale. Et mobiliser des processus jusqu'ici négligés (*i.e.* complémentarité de plusieurs espèces dans le même champ, interactions entre champs cultivés...) dans l'invention de nouvelles manières de produire, a nécessité le développement de démarches auxquelles les agriculteurs et les organismes de Recherche et Développement (R&D) liés à l'agriculture participent. Il s'agit de **démarche de conception de systèmes de culture** (Encadré 1) innovants et durables (Meynard et al., 2006).

La conception de système de culture porte sur la combinaison de leviers appliqués à l'échelle de la parcelle, comme celles listées en amont (cf. Tableau 1.3), ou d'autres leviers à concevoir, et de prendre en compte explicitement leurs interactions. Dans l'objectif de protéger la qualité des eaux souterraines, concevoir **des scénarios de systèmes de culture** consiste à limiter les conditions favorables aux bio-agresseurs, dans le temps, en jouant sur les successions culturales et les assolements :

- Allongement des rotations (Altieri and Nicholls, 2004; Deike et al., 2008; Scholberg et al., 2010)
- Alternance de cycles de cultures d'hiver et de printemps pour éviter l'installation des adventices dont le cycle de développement est associé à celui de la culture,
- Alternance de cultures hôtes/non-hôtes pour les bio-agresseurs dominants (Gurr et al., 2003)
- Associations de cultures (une céréale et une légumineuse par exemple) (Drinkwater et al., 1998)
- Introduction de cultures ou couverts allélopathiques (Holderbaum et al., 1990; Martinez and Guiraud, 1990; Meisinger et al., 1991)
- Alternance des profondeurs de travail du sol (Hall et al., 1991; Hall and Mumma, 1994)

Un des cas-types de conception de systèmes de culture qui répondent à l'enjeu de préservation des ressources en eau souterraines est un projet de recherche mené par l'INRA (Reau et al., 2012) situé sur les

bassins d'alimentation de deux captages qui alimentent la ville de Briennon-sur-Armançon (89), secteur de grandes cultures. Cette **méthode de conception de système de culture** s'appuie sur celle proposée par Vereijken (cf. § 2.2.1) en parallèle d'une méthode participative impliquant les agriculteurs dans la conception. En premier lieu, le cadre des contraintes et des leviers mobilisables est défini pour répondre aux objectifs des agriculteurs. Les ateliers de conception sont composés de 6 à 7 agriculteurs, un nombre optimal pour ne pas manquer de forces vives ni de diminuer la motivation individuelle (Reau et al., 2012). Le partage de « **connaissances exploratoires** » d'une part (les savoirs et savoir-faire sur le point d'aboutir permettant de répondre aux enjeux visés) et de « **connaissances localisées** » d'autre part (connaissances sur les systèmes de culture actuels dans les contextes étudiés) semble nécessaire à la richesse des explorations réalisées lors **des ateliers de conception** (Reau et al., 2012).

Les résultats de cette démarche montrent qu'une telle construction de scénarios nécessite une phase d'apport de connaissances et de formation des agriculteurs, une participation active et motivée des agriculteurs au travail collectif de l'atelier et un éclairage par les chercheurs des résultats potentiels de qualité d'eau grâce à un tableau de bord créé collectivement. Il s'agit d'une démarche qui regroupe plusieurs acteurs locaux (conseillers de la chambre, agriculteurs, chercheurs) et qui a permis de croiser leurs attentes en termes de durabilité (Paravano et al., 2016).

Encadré 2: Définitions des concepts clés en agronomie

Agroécologie

Il s'agit **un ensemble de méthodes et de pratiques, socle d'une révision des liens entre agriculture et écosystèmes dont le but est de garantir la préservation des ressources naturelles** (Altieri, 1989). L'agroécologie est alors considérée comme un cadre d'action et d'innovation qui propose des concepts, des outils et des pratiques facilitant la transition vers des systèmes durables (Wezel et al., 2011). Cela signifie '**travailler avec des variations temporelles et spatiales et non pas contre elles**' (Bell et al., 2008). Les **pratiques agroécologiques** valorisent de la meilleure façon les processus écologiques et les services écosystémiques, en les intégrant comme des éléments fondamentaux dans le développement des pratiques, et pas simplement en se basant sur des techniques ordinaires, tels que les fertilisants, pesticides, insecticides ou des solutions technologiques, tels que les organismes génétiquement modifiés (Wezel et al., 2014).

Système de culture

« Ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique. Il se définit par (i) la nature des cultures et leur ordre de succession, (ii) les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés pour les cultures retenues » (Sebillotte, 1990).

L'itinéraire technique

« Combinaison logique et ordonnée de techniques culturales appliquées à une culture pour contrôler le milieu en vue d'une production donnée » (Sebillotte, 1978).

2.3.3 La conception à l'échelle du territoire à enjeu eau

Répondre à un problème dont au moins un des processus comporte un flux à une échelle spatiale plus large que la parcelle requiert de **considérer une unité géographique élargie**. Plusieurs processus, ayant des impacts environnementaux se jouent à des **échelles supra-parcellaire** : processus érosif, migration d'espèces mobiles, dispersion du pollen... L'étendue du territoire pris pour l'enjeu de qualité des eaux souterraines correspond le plus souvent à l'AAC. Les scénarios, conçus à l'échelle du territoire à enjeu eau, visent la répartition spatiale des systèmes de culture, en fonction non seulement des potentialités du milieu mais aussi de leurs fragilités écologiques (vulnérabilité de la nappe, texture du sol...). L'instauration de surfaces de compensation écologique (haies, biotopes naturels, fossés...) a pour but de favoriser les populations d'auxiliaires susceptibles de contribuer au contrôle biologique des bioagresseurs, et par conséquent à l'utilisation moindre de produits phytosanitaires (Bianchi et al., 2006; Thies, 1999).

Un des cas-types de conception de scénarios à l'échelle du territoire à enjeu eau est un projet de recherche appelé Co-click'eau (Chantre et al., 2016, 2012; Gisclard et al., 2015). Cette démarche s'appuie sur une **démarche participative**, reposant notamment sur **l'utilisation partagée d'un modèle**. Elle mobilise les acteurs locaux, depuis les acteurs de la gestion de l'eau jusqu'aux agriculteurs. Elle permet de concevoir des scénarios cohérents vis-à-vis de leurs contraintes et objectifs, tout en permettant de reconquérir la qualité des eaux souterraines. Cela résulte d'une itération de simulation des scénarios optimaux afin de produire à terme un scénario acceptable par tous. Cette démarche a été mise au point sur trois AAC situées dans les régions Centre, Nord-Pas de Calais et Haute Normandie, et a, depuis, été mobilisée dans un grand nombre de territoires. Les scénarios proposés par le modèle d'optimisation traduisent une répartition des systèmes de culture à l'échelle de l'AAC (Chantre et al., 2016). A la même échelle, il y a le cas du bassin versant Rio Mannu, en Sardaigne (Italie) où des scénarios ont été conçus par les acteurs locaux et évalués par un modèle de simulation SWAT (De Girolamo and Lo Porto, 2012). Les scénarios proposés visent dans ce cas la diminution de l'utilisation des intrants azotés de 20% et l'introduction du colza pour rompre la monoculture de blé sur le bassin versant. L'introduction du colza dans ce secteur diminue la pression des adventices et des maladies pour le blé mais augmente l'apport d'azote total.

Depuis de nombreuses années, la recherche agronomique a fortement ciblé l'échelle de la parcelle pour proposer des solutions techniques pour réduire le phénomène de lixiviation des nitrates et pesticides. Cependant, le phénomène de lixiviation est le résultat d'interactions multifactorielles qui nécessitent parfois de se placer à une échelle temporelle et spatiale plus large que celle d'une parcelle. De ce constat, se sont développées de nouvelles démarches portant sur la conception innovante de systèmes de culture. Concernant l'enjeu de protection de la qualité des eaux souterraines, différentes démarches de conception se sont développées, faisant appel à divers outils de conception (modèle, expérimentation et accompagnement de l'acteur) dont les sorties se déclinent sur deux échelles : le système de culture et le territoire à enjeu eau.

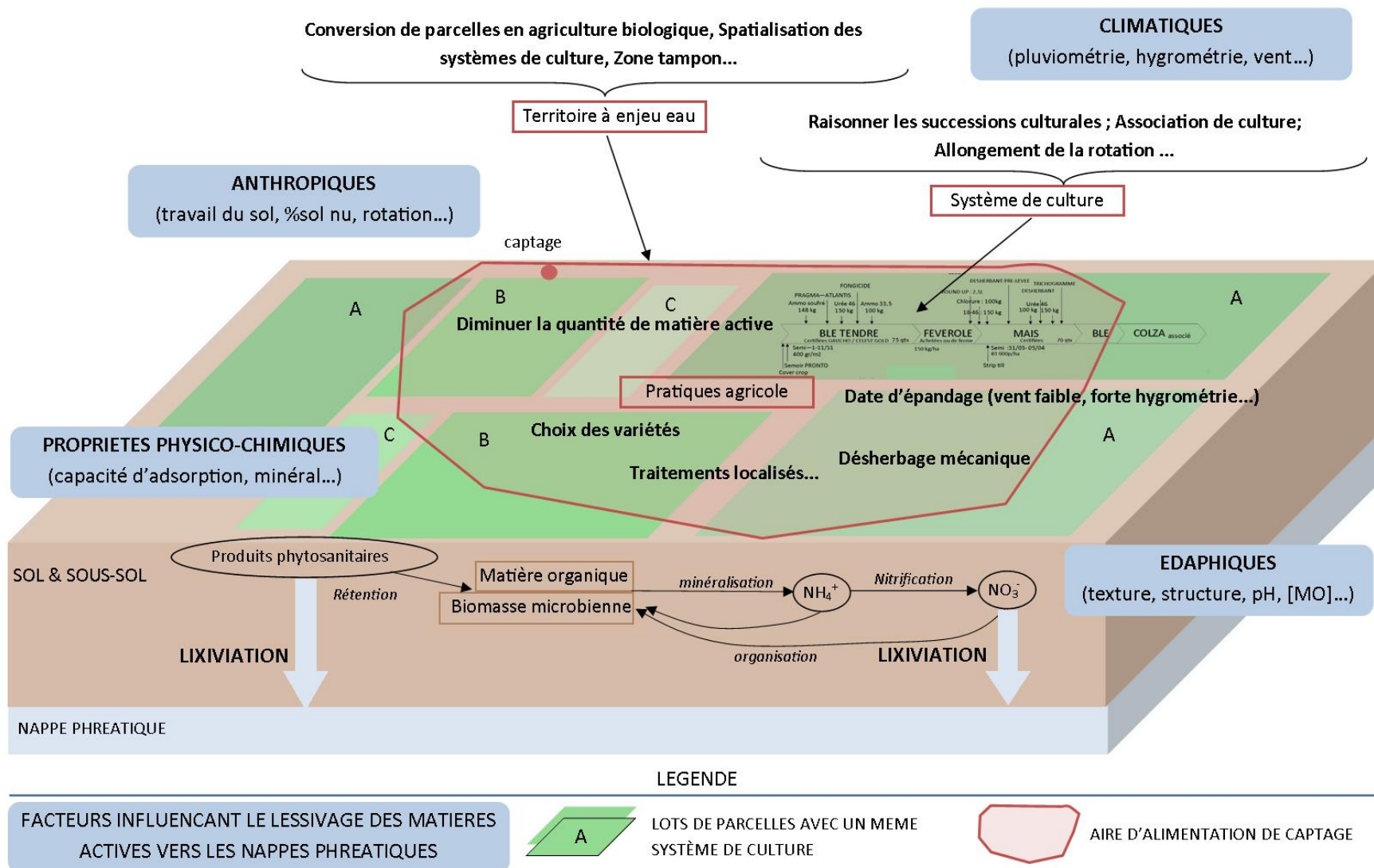


Figure 1. 7 : Les différents facteurs qui influencent le phénomène de lixiviation de pesticides et nitrates et les échelles auxquelles portent les solutions issues de la recherche et développement

2.4 Nécessité d'une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole pour atteindre un objectif de mise en œuvre

2.4.1 Les raisons d'une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole

De nombreux travaux de recherche se sont intéressés à la dynamique de changement des agriculteurs, appréhendée par la **notion de trajectoire**, incluant l'étude d'un changement tel que le développement de systèmes plus économes en intrants (Cerf et al., 2010; Chantre, 2011), la conversion en agriculture biologique (Lamine et al., 2009) et la transition vers des pratiques agro-écologiques (Dupré et al., 2017). Retracer les trajectoires permet de caractériser la façon dont les agriculteurs mettent en œuvre un changement dans leur exploitation mais aussi d'identifier les facteurs et antécédents qui permettent de favoriser ce changement. Ces travaux s'appuient sur le cadre développé par Hill & MacRae (1996) distinguant trois manières d'agir : l'efficience, la substitution et la reconception. Ce cadre ESR permet ainsi, d'étudier les stratégies de transition de l'agriculteur vers des agricultures plus économes en intrants, et d'étudier plusieurs types de transition. Ces travaux sur les trajectoires soulignent le caractère progressif de ces transitions et la manière dont elles **n'engagent pas seulement les changements techniques**.

En effet, la mise en pratique par les agriculteurs de nouvelles techniques se heurte à plusieurs difficultés qui entraînent une **modification plus globale** des systèmes de cultures. Cette application peut avoir aussi des conséquences potentielles sur le travail et les moyens mis en place par l'exploitant (*e.g.* le semis tardif diminue la pression de pucerons sur blé mais diminue la qualité et rendement de la récolte (Casagrande, 2008)); le semis de couverts de moutarde en interculture permet de contrôler les adventices et restructure le sol mais provoque de nouveaux risques sanitaires tels que la hernie du chou sur colza, si implanté dans les 2/3 ans à la suite). Munier-Jolain et al. (2008) mettent en évidence des **tensions au niveau des calendriers de travail et des revenus de l'agriculteur** pour mettre en place les systèmes de culture à bas intrants.

Afin de favoriser et accompagner les changements proposés par les agriculteurs, il est nécessaire d'adopter **une approche systémique** (Meynard, 2017) qui permette d'appréhender la complexité du système en le considérant **comme « un large ensemble de composantes qui sont interdépendantes »** (Landais, 1994). À l'échelle de l'exploitation agricole, l'approche systémique se traduit par le fait qu'on étudie la façon dont **les systèmes de culture interagissent entre eux**, et sont liés aux ressources de l'exploitation agricole et à son environnement socio-économique (cf. Figure 1.9). Dans l'approche systémique, le rôle du décideur (l'agriculteur) est fondamental puisqu'il oriente, de manière cohérente, l'évolution du système, dans un environnement donné, en lui assignant des objectifs (Lefèvre, 2013). Cette **approche globale à l'échelle de l'exploitation agricole** permet de prendre en compte la stratégie de l'agriculteur tout en considérant les interactions entre systèmes de culture et l'attribution des ressources matérielles et humaines.

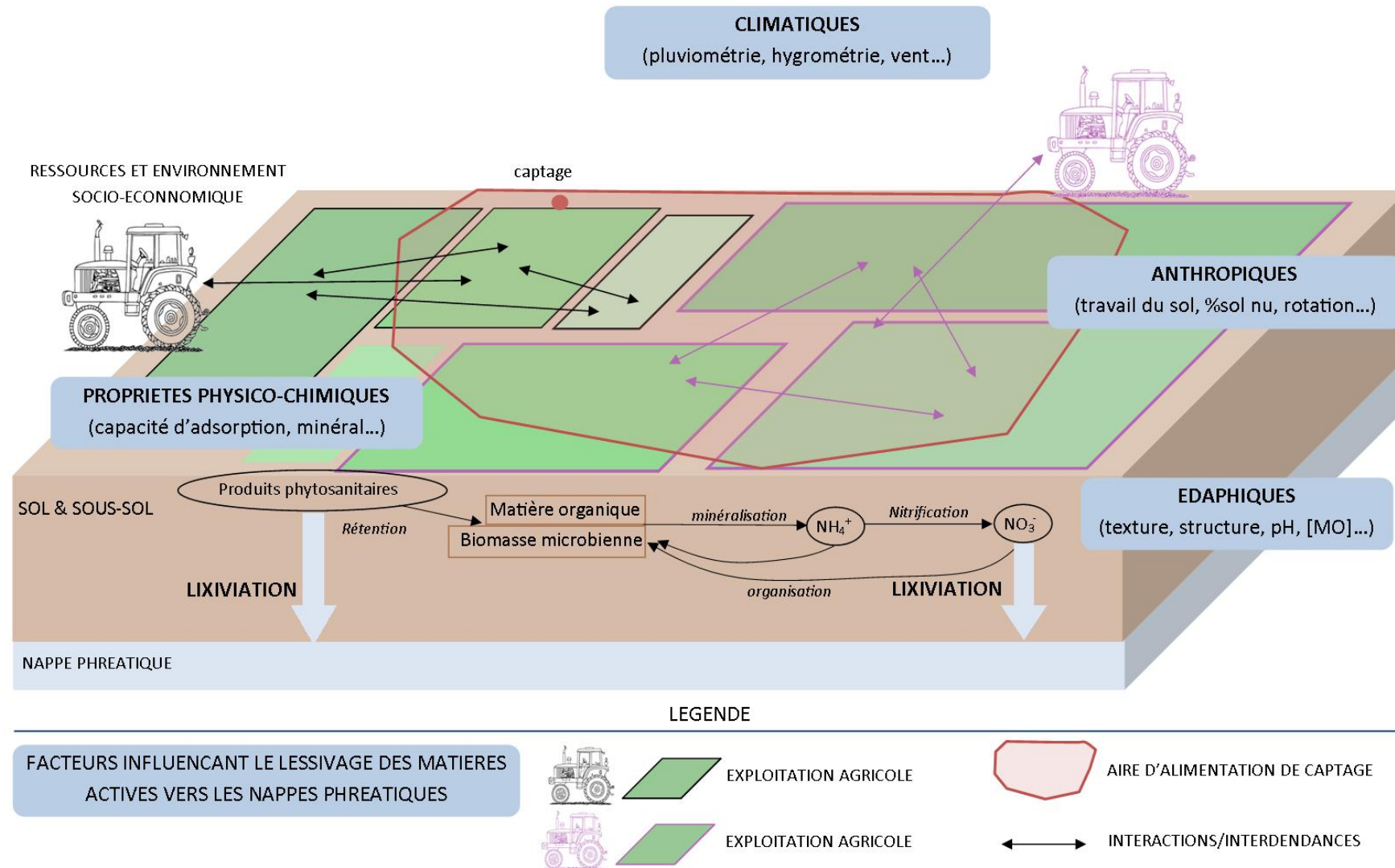


Figure 1. 8: Les différents facteurs qui influencent le phénomène de lixiviation de pesticides et nitrates et les interactions/interdépendances entre les systèmes de culture, les ressources et l'environnement socio-économique qui constituent une exploitation agricole

2.4.1 Le cadre d'analyse basée sur une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole

Pour établir le cadre d'analyse de la thèse à l'échelle de l'exploitation, il faut introduire le concept de **fonctionnement technique de l'exploitation agricole**, soit « l'enchaînement des prises de décisions de l'agriculteur et de sa famille dans un ensemble de contraintes et d'atouts, en vue d'atteindre des objectifs qui régissent des processus de production » (Sebillotte, 1979). Ce concept fait référence au **modèle d'action** (Aubry et al., 1998; Cerf and Sebillotte, 1997; Sebillotte and Soler, 1990) qui s'intéresse à la manière dont l'agriculteur choisit et gère les composantes techniques de son système de production. Ce modèle d'action a été utilisé pour étudier, par exemple, les choix d'assolement et de rotations (Maxime et al., 1995), l'organisation du travail (Duru et al., 1988) ou la conduite de la sole d'une culture, comme le blé d'hiver dans le bassin parisien (Aubry et al., 1998).

Dans ce modèle, les systèmes de culture sont en **interdépendance** et résultent de processus décisionnels complexes en lien avec la disponibilité des ressources, influencés pour partie par l'environnement socio-économique. Au sein de son exploitation, l'agriculteur se fixe des **objectifs à atteindre** et cherche, pour réaliser ses objectifs, à utiliser au mieux les interactions positives entre techniques, cultures et milieux. Cependant, les ressources matérielles et immatérielles et les facteurs de production étant limités, l'agriculteur ne peut pas toujours optimiser ces interactions. L'analyse détaillée de ces interactions associées aux objectifs de l'agriculteur, permet donc d'identifier les capacités techniques et organisationnelles à intégrer de nouvelles pratiques agricoles, les **marges de manœuvre** (Joannon, 2004; Papy et al., 2001). Les leviers, dans l'exploitation et dans le territoire, pour rendre plus accessibles les ressources utiles à ces changements, peuvent ensuite être développés.

Selon Aubry et Michel-Dounias (2006), les changements que connaît toute exploitation agricole sont liés à la fois aux **modifications structurelles et stratégiques**. On parle de modification structurelle quand il s'agit d'un changement intervenant sur les variables décisionnelles (ce sur quoi l'agriculteur doit décider (Aubry, 2007)), comme par exemple l'itinéraire technique, le système de culture ou les ressources humaines et matérielles. On parle de modification stratégique lorsqu'il s'agit d'un changement de règles de décision (Aubry, 2007) en lien avec les objectifs de l'exploitation agricole. Dans ce travail de thèse, la représentation que l'on fait d'une exploitation agricole repose donc sur la **combinaison structure et stratégie** (cf. Figure 1.8).



Figure 1. 9 : Fonctionnement d'une exploitation agricole

Les scénarios issus d'une démarche participative pour protéger la qualité des eaux souterraines portent sur des systèmes de culture et leurs combinaisons à l'échelle du territoire. Or, nous avons démontré qu'il est pertinent d'avoir une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole pour mettre en œuvre des modifications adéquates et pérennes au sein des exploitations. Afin d'appréhender cette échelle tout au

long de ce travail de thèse, nous avons établi le cadre d'analyse qui repose sur la combinaison structure et stratégie d'une exploitation. Dans le paragraphe suivant, nous caractérisons les différentes démarches participatives qui embarquent cette échelle et les classons en fonction de la stratégie d'utilisation des connaissances des agriculteurs.

3. ENGAGER UN CHANGEMENT DANS LA DUREE : LES APPORTS D'UNE APPROCHE PARTICIPATIVE

3.1 Nécessité d'une approche participative pour la gestion durable d'une ressource naturelle

La notion de « tragédie des biens communs », décrite par Hardin (1968), symbolise la dégradation de l'environnement à laquelle il faut s'attendre dès le moment où plusieurs individus utilisent en commun une ressource limitée. Autrement dit, les individus qui partagent une **ressource commune** (comme l'**eau souterraine**) sont inéluctablement pris dans un piège dont ils ne peuvent s'échapper : celui de la dégradation irréversible de cette ressource.

De ce constat, ont émergé de nombreuses approches pour résoudre cette « tragédie » (Carruthers and Stoner, 1981; Demsetz, 1967; Heilbroner et al., 1974; Ophuls et al., 1977; Smith, 1981). Smith (1981) et Demsetz (1967) proposent l'adoption d'un système de droits privés pour la gestion d'une ressource commune telle que l'eau, tandis que Heilbroner (1974) sollicite l'intervention des « gouvernements de fer » appelés aussi « *Léviathan* » qui définissent et imposent la gestion des ressources communes (Hobbes, 1969).

Par opposition à ces méthodes, Ostrom (1990) a une vision plus optimiste et moins interventionniste. Elle prône ainsi la **capacité des communautés d'individus** à traiter de manière créative et constructive des problèmes pervers tels que la « tragédie des biens communs ». Ainsi, les **utilisateurs directs des ressources naturelles** sont aujourd'hui souvent identifiés comme des alliés importants, en raison de leur **savoir écologique traditionnel** (Brosius, 1997). Dans cette logique, un large panel de méthodes et outils a été développé dans les années 90' pour comprendre les **contextes, pratiques et savoir-faire locaux** (Chambers and Thrupp, 1994; Pretty, 1995; Röling and Wagemakers, 2000). Ces approches illustrent la reconnaissance de la capacité des acteurs locaux à trouver des solutions aux problèmes et tentent vers un rééquilibrage de la relation entre le monde agricole et la recherche.

Dans le domaine agricole, le « Participatory Rural Appraisal » PRA (Chambers, 1994) représente une famille d'approches qui considère que chercheurs et agriculteurs doivent construire ensemble les évolutions techniques. Ainsi, de nombreux travaux proposent des méthodes participatives incluant de façon variée les acteurs locaux pour limiter les impacts environnementaux liés à l'activité agricole (Ducrot et al., 2015; Étienne, 2011; Johnson et al., 2002; Lançon et al., 2008; Mischler et al., 2009, 2008; Reau et al., 2013, 2012; Souchère et al., 2010). Les scénarios qui émergent de ces démarches peuvent être déclinés à différentes échelles, de la parcelle au territoire en ciblant pour certaines les exploitations agricoles. Nous avons fait le choix de ne présenter que les démarches participatives qui s'appliquent à l'échelle de l'exploitation agricole.

Dans le domaine de gestion des ressources naturelles, la participation de divers acteurs est proclamée comme un moyen de construire la capacité adaptative et l'apprentissage social requis pour le développement et le maintien d'une gestion durable de protection de la ressource (Pahl-Wostl et al., 2007). La clé de réussite de la recherche participative n'est pas la méthode développée mais la place prise par les chercheurs et les non-chercheurs au cours du processus. La différence la plus révélatrice entre la recherche participative et la recherche conventionnelle se trouve « dans celui qui définit les problèmes de recherche et celui qui analyse, produit, représente, possède et agit sur les informations demandées » (Cornwall and Jewkes, 1995).

Au sein des démarches participatives, on peut distinguer différents niveaux d'implication des acteurs locaux et praticiens pour toutes ces actions à commencer par la production de nouvelles connaissances. C'est pourquoi nous distinguons les démarches participatives qui conçoivent à l'échelle de l'exploitation agricole en fonction du pouvoir donné aux agriculteurs tout au long du processus.

3.2 Mobilisation des connaissances et flux d'informations lors des démarches participatives

Le partage de connaissances, et l'apprentissage individuel et collectif, sont des aspects clés dans une méthode participative pour inciter l'exploration de nouvelles connaissances et promouvoir le développement de scénarios innovants. Trois classes de connaissances peuvent être mobilisées et échangées par les agriculteurs au cours d'une démarche participative de conception (Lefèvre, 2013). Il peut s'agir des **connaissances « empiriques »**, construites dans l'action par les agriculteurs et issues des expérimentations et observations faites dans leur propre exploitation et donc localisées (Raymond et al., 2010). Il faut distinguer ces connaissances de celles issues le plus souvent d'apports extérieurs que sont les **connaissances exploratoires**. Ces dernières proviennent des lectures (journaux, revues, internet) et des échanges avec les voisins et conseillers, elles sont caractérisées par un niveau d'incertitude plus élevé. La dernière classe présente les **connaissances scientifiques** établies par le monde de la recherche. Elles sont souvent diffusées par les chercheurs via la littérature académique et les interventions orales lors de séminaire entre pairs ... Mais elles peuvent également être utilisées et diffusées par les agriculteurs (Girard and Navarrete, 2005).

Les connaissances détenues par les agriculteurs sont aujourd'hui valorisées et mises en avant lors des processus de conception pour des systèmes agricoles durables (Altieri and Toledo, 2005; Doré et al., 2011a; Goulet et al., 2008; Reau et al., 2012; Willaume et al., 2014). Ainsi, au sein de ces démarches participatives, il peut y avoir différentes stratégies de prise en compte des connaissances des agriculteurs et donc de leur rôle au cours du processus (cf. Tab. 1.4):

Définissent-ils les questions de recherche ? Analysent-ils et représentent-ils les informations ? Produisent-ils les connaissances ? Agissent-ils ?

Nous avons donc développé une typologie pour caractériser les démarches participatives en fonction du degré auquel les agriculteurs contribuent à la production, l'utilisation et au contrôle de l'information lors du processus qui correspond aux trois phases d'une démarche de conception de scénarios (cf. Tab. 1.4).

Tableau 1.4 : Typologie des démarches participatives en fonction du type de participation des agriculteurs

Phase de conception	Les agriculteurs participent ...	INFORMATION	CONSULTATION	DIALOGUE	CO-CONCEPTION
1	À la définition des objectifs et des contraintes		X	X	X
1	Au paramétrage en fournissant des indications sur leurs exploitations		X	X	X
2	A la création de l'innovation				X
3	A la sélection et la mise en œuvre des scénarios			X	X
3	À l'évaluation des scénarios, en proposant des critères d'évaluation et des indicateurs			X	X

Elle est issue d'une hybridation de la typologie des degrés de contribution à l'information utilisée dans le processus établie par Barreteau et al. (2010), et de celle des stratégies d'utilisation des connaissances des praticiens établies par Girard (2015). On distingue 4 types d'implications des agriculteurs dans le processus utilisant les mêmes appellations que celles proposées par Barreteau et al. (2010) :

1. **Information.** Les agriculteurs ne sont pas impliqués dans le processus de recherche, et leurs connaissances sont évaluées dans un but de les améliorer (Girard, 2015).
2. **Consultation.** Les agriculteurs et autres acteurs locaux sont impliqués dans le processus de recherche et fournissent des informations aux chercheurs qui les documentent afin de les capitaliser et les légitimer dans un processus de développement.
3. **Dialogue.** Il s'agit de véritables interactions itératives entre les chercheurs, acteurs locaux et agriculteurs tout au long du processus. Les connaissances des agriculteurs sont utilisées comme source d'innovation mais la principale source de connaissances reste scientifique (cf. Tab. 3).
4. **Co-conception.** Les agriculteurs, acteurs territoriaux et chercheurs sont mis sur un même pied d'égalité concernant l'apport de connaissances. La connaissance des agriculteurs n'est pas seulement une source mais peut créer de l'innovation.

Cette typologie sera présentée et illustrée de façon plus détaillée dans le paragraphe suivant 3.3

3.3 Classification et caractéristiques des démarches participatives s'appuyant sur une approche systémique appliquée à l'échelle de l'exploitation agricole

3.3.1 Type 1: « Information » couplée à une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole

Ces démarches de type « information » sont souvent orientées autour d'un travail de modélisation, ici à l'échelle de l'exploitation agricole, fait par les chercheurs sans la participation directe des acteurs. Néanmoins, beaucoup d'articles concluent sur la manière dont leur modèle pourrait être utilisé par les agriculteurs ou leurs conseillers, sans pour autant les inclure dans la conception (Buysse et al., 2005; Zingore et al., 2009).

Le développement d'un modèle couplé à une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole peut avoir plusieurs objectifs. Cela permet de tenir compte du fonctionnement d'une exploitation agricole en intégrant les composantes biotechniques, économiques et humaines afin d'explorer, par exemple, les meilleurs compromis en termes de main d'œuvre et de gestion des nutriments (*e.g.* en augmentant la production d'arachides dans les fermes du Zimbabwe) (Zingore et al., 2009) ou de gestion de la balance azotée en exploitation laitière (Buysse et al., 2005). Il peut s'agir d'appréhender la notion de risque de production et environnemental dans l'adoption par les agriculteurs de nouveaux systèmes agricoles (De Buck et al., 1999). Le modèle peut être utilisé comme un outil de conseil auprès des agriculteurs (Bernet et al., 2001) permettant de simuler des changements au sein de l'exploitation agricole. En effet, une fois paramétré, le modèle permet de tester des systèmes de production dans une large gamme de conditions (sol, climat ...) inaccessibles à l'expérimentation, et dans un délai relativement court. Il permet en effet d'évaluer de manière *ex ante* de multiples scénarios, et d'explorer la sensibilité des résultats à une évolution du contexte comme, par exemple, le réchauffement climatique ou le phénomène d'érosion dans des exploitations maraîchères d'Uruguay (Dogliotti et al., 2005). À l'échelle de l'exploitation agricole, il s'agit le plus souvent de modèles biotechniques pour lesquels les décisions des agriculteurs sont le plus souvent représentées par des valeurs données par l'utilisateur du modèle et non par l'agriculteur lui-même (Le Gal et al., 2011). Seuls certains modèles ont été développés autour de la simulation des règles de décision d'une exploitation agricole (Attonaty et al., 1999; Joannon, 2004; Romera et al., 2004) basée sur le concept du modèle d'action présenté en amont (cf. paragraphe 2.2.2).

Ces démarches de type « information » comportent cependant plusieurs limites, dont la principale est la faible participation des agriculteurs. Cette méthode de conception est lourde à mettre en œuvre, car la technique de modélisation est complexe et ne peut donc être utilisée par des conseillers, d'autant plus s'ils ne sont pas associés à la modélisation. Il manque par ailleurs une expérimentation de terrain du système conçu *in silico*. Une amélioration de ce type de méthode consiste à inclure les acteurs dans la démarche, comme proposé par Thornton et Herrero (2001), dans leur approche de « modélisation participative » présentée plus loin.

3.3.2 Type II : « Consultation » couplée à une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole

Ces démarches participatives de type « consultative » impliquent le plus souvent les agriculteurs pour définir les objectifs du système et fournir des données sur leurs exploitations pour alimenter la conception. Dans ce type de démarche se trouve la méthode de prototypage (Vereijken, 1997). Cette méthode a été utilisée, par exemple, lors de la conception de nouveaux prototypes pour une meilleure gestion des exploitations agricoles en culture de bananiers, qui aborde simultanément les problèmes de fertilité des sols et du contrôle des nématodes, ravageurs de culture (Stoorvogel et al., 2004b). Elle a notamment été développée en France sur le domaine expérimental de l'INRA de Mirecourt pour aider à la conception d'un système d'élevage laitier herbager et un système de polyculture élevage laitier (Coquil et al., 2009). Au sein de ces démarches, la conception du prototype provient des connaissances scientifiques apportées de façon conjointe par les chercheurs et les experts sans inclure les agriculteurs, après identification de leurs objectifs. Le prototype peut être un scénario visant (i) une meilleure gestion de la

balance azotée en exploitation laitière testée en ferme expérimentale (Aarts et al., 2000) ou (ii) la conversion en agriculture biologique des exploitations agricoles en Camargue, France (Delmotte et al., 2016).

Dans le cadre d'une étude sur le phénomène d'érosion, une méthodologie opérationnelle a été bâtie pour concevoir une modification des systèmes de culture, au sein des exploitations agricoles, afin d'éviter tout phénomène d'érosion (Joannon, 2004). La méthode élaborée permet d'identifier les marges de manœuvre des agriculteurs pour modifier les systèmes de culture à partir d'une reconstitution des règles de localisation des cultures sur le territoire d'exploitation et d'organisation du travail. Les principales techniques culturales retenues pour limiter l'érosion sont le déchaumage à sec (précédant céréales à paille, pois et pomme de terre) et le semis de moutarde (précédant lin et colza). Elles ont été retenues du fait de leur adéquation à l'organisation du travail des exploitations agricoles enquêtées. L'efficacité des modifications des systèmes de culture possibles dans chaque exploitation agricole est alors testée avec le modèle STREAM qui permet de combiner les scénarios à l'échelle de l'exploitation agricole à ceux du bassin versant pour simuler l'effet sur la ressource en eau.

Bien que Vereijken (1999) ait souligné l'intérêt d'articuler les innovations *bottom-up* avec les innovations *top-down*, et propose d'impliquer agriculteurs et chercheurs dans les démarches de prototypage, il n'en reste pas moins que l'efficacité de la méthode a été critiquée du point de vue du mode de transfert de connaissances et d'échanges entre chercheurs et agriculteurs (Oenema et al., 2001).

3.3.3 Type III : « Dialogue » couplé à une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole

Lors de ces démarches de type « dialogue », les chercheurs et agriculteurs sont mis sur un même pied d'égalité, mettant en avant l'échange de connaissances et partageant le pouvoir de décision durant le processus. Les données relevées auprès des agriculteurs et autres acteurs locaux peuvent être traduites en modèle par les chercheurs, dont les résultats issus du modèle sont sources de discussion par la suite. Par exemple, une approche ludique a été développée pour aider les agriculteurs dans la modélisation de leurs systèmes d'élevage adaptés aux nouveaux objectifs et/ou aux changements du contexte de production (Martin et al., 2011). C'est l'utilisation d'une plate-forme de jeu, où les joueurs (agriculteurs et autres professionnels agricoles) construisent avec leur savoir-faire empirique diverses manières d'organiser leur fourrage et le troupeau dans leurs systèmes agricoles. Ces résultats sont ensuite évalués avec des indicateurs technico-économiques, co-construits par les participants. Le développement de cette plate-forme a été initié sur une proposition faite par les scientifiques qui ont défini la problématique de départ et qui ont développé ce jeu sur la base des connaissances scientifiques disponibles.

Dans ce type de démarche, les connaissances scientifiques apportées par les chercheurs, et donc le pouvoir qui leur est donné, prennent encore une place centrale dans la conception. Dans l'étude de Dorward et al. (2003), la démarche utilise les connaissances locales pour établir des méthodes d'évaluation du scénario qui découle, non pas d'un échange avec les agriculteurs, mais d'une proposition faite par les chercheurs sur l'insertion d'engrais vert dans leur système de production de tomates. Il en est

de même pour l'étude de Bonny et al. (2005) qui proposent des scénarios d'évolution de systèmes agricoles à travers des choix dans un panel d'options scientifiques prouvées comme performantes.

3.3.4 Type IV : « Co-conception » couplée à une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole

Lors de ces démarches de « co-conception », les chercheurs et agriculteurs sont partenaires et les décisions sont faites par consensus. On parle de co-conception lors d'un **processus de conception collectif**, un concept introduit par Granath (1996) dans les années 90. Il s'agit d'une activité de conception participative où tous les acteurs sont considérés comme experts et leur participation est basée sur leurs connaissances propres plutôt que sur les rôles qu'ils jouent ou les intérêts qu'ils représentent. Le travail de conception dans un tel processus collectif est donc à la fois pluridisciplinaire et « pluri-hiérarchique ». Ce type de démarche est fortement dépendant de la participation des agriculteurs. En effet, ils sont chargés de définir les objectifs et contraintes, d'aider au paramétrage du système et dans sa modélisation, de construire des systèmes innovants (jusqu'à sa mise en œuvre si le temps le permet) et de participer à l'évaluation *ex ante* ou *ex post*.

Dans ce type de démarche, se trouve la modélisation d'accompagnement (ComMod) développée par une communauté de chercheurs depuis 1996 (Étienne, 2010). Elle se fonde sur une dynamique d'échanges entre les différentes catégories d'acteurs autour de la gestion d'une ressource. Il s'agit d'une implication active des acteurs soit dans l'explication de leur vision du monde, soit dans la construction d'objets intermédiaires, soit dans la formulation de projets pour l'avenir. Le but de la démarche ComMod est de faciliter le processus d'apprentissage entre les différentes parties prenantes afin de les aider à surmonter leurs potentiels conflits et d'accompagner leur négociation en cours. Elle ouvre la voie à un mode de négociation intégré et à la conception de scénarios prospectifs. Cette méthode a été utilisée dans le cadre de gestion de ressources en milieu rural. Par exemple, un jeu de rôles réunissant agriculteurs, élu et animateur de bassin versant, a servi de base à l'émergence d'une réflexion collective (Souchère et al., 2010). Celui-ci, nommé « CauxOpération® », a été conceptualisé suivant une co-conception dans laquelle l'équipe scientifique et les principaux acteurs locaux ont collaboré étroitement. Cette démarche ComMod a été mobilisée pour permettre de créer des conditions de concertation et de négociation entre les acteurs, qui, placés dans un bassin versant fictif, sont confrontés à de sévères problèmes de ruissellement et perçoivent la nécessité de mettre en place des aménagements. Les résultats montrent des scénarios individuels à l'échelle de l'exploitation agricole, qui découlent des processus d'apprentissage qui ont eu lieu chez les participants, et d'une réflexion collective mobilisant les connaissances et les représentations de chacun. De même, Vayssières (2008) a conduit une étude visant à la construction participative d'un modèle de simulation dynamique du fonctionnement de l'élevage laitier à La Réunion. Quant à Thornton and Herrero (2001), ils ont conduit une étude visant à développer une démarche de modélisation participative afin de coupler les modèles de culture et d'élevage. Ici les acteurs agricoles interviennent à tous les stades de la modélisation, depuis la conception du modèle décisionnel jusqu'à son utilisation, en passant par son évaluation et son amélioration.

Un autre exemple, issu des travaux de Cardoso et al. (2001), avait pour objectif de concevoir des systèmes agroforestiers améliorant la fertilité des sols et diminuant les phénomènes érosifs sur des zones de culture déforestées au Brésil. L'étape de conception après diagnostic a été faite lors d'un comité composé d'agriculteurs qui ont proposé l'agroforesterie comme une solution aux problèmes de dégradation des sols. Dans ce processus, les agriculteurs conçoivent l'innovation et sont acteurs dans le choix des indicateurs à suivre pour évaluer la mise en œuvre de systèmes agroforestiers. On retrouve un pouvoir similaire donné aux agriculteurs dans divers exemples tels que le développement de l'agroforesterie au Brésil (Souza et al., 2012) l'amélioration de la fertilité des sols au sud du Mali (Defoer et al., 1998) , la diminution de la pollution des eaux de surface en nitrates en Bretagne (Levain et al., 2014), la conception de systèmes innovants notamment sur la gestion de la fumure organique des cultures au Burkina Faso (Vall et al., 2016), ou enfin l'évaluation des techniques innovantes pour une agriculture durable des exploitations en polyculture-élevage (Ryschawy et al., 2014).

Les quatre types de démarches participatives illustrent la diversité de processus d'innovation dans le domaine du développement agricole. Le type I représente le modèle diffusionniste pour lequel les agriculteurs sont considérés comme des récepteurs et applicateurs de nouvelles techniques conçues par des acteurs de la recherche agronomique (e.g. outil d'aide à la décision conçu pour être appliqué par les agriculteurs). Ce modèle a largement façonné le processus de modernisation de l'agriculteur en France à partir des années soixante (Goulet et al., 2008). A l'inverse, le type IV met en avant que les agriculteurs ne sont pas juste des producteurs mais expérimentent des nouvelles techniques et sont aussi créateurs de connaissances, locales certes mais qui peuvent être reprises par d'autres agriculteurs du territoire et par les chercheurs. C'est sur ce dernier constat que l'on se base pour développer une démarche participative qui permet de concevoir et évaluer des scénarios sur mesure adaptés au fonctionnement des exploitations agricoles et permettant de protéger la qualité des eaux souterraines.

4. QUESTIONS ET DEMARCHE DE RECHERCHE

Au vu des éléments issus de l'analyse bibliographique réalisée dans la première partie de ce document, les flux des nitrates et pesticides dans le sol et les facteurs influençant le phénomène de lixiviation vers les nappes phréatiques sont complexes. Aujourd'hui, le défi est de passer du traitement curatif de l'eau à la réduction des risques de pollution, en intervenant en amont sur les volumes de pesticides et fertilisants azotés épandus et sur les moyens de limiter le phénomène de lixiviation pour la production d'eau potable. Ce défi implique donc d'engager des **changements significatifs** des pratiques de gestion des intrants participant à limiter la pression sur la ressource en eau souterraine, avec **des scénarios adaptés aux situations locales** rencontrées. Les dispositifs réglementaires mis en place pour y répondre entraînent l'écriture d'un ensemble de mesures standardisées, qui ne sont pas ou peu adoptés par les agriculteurs ou abandonnés aussitôt que l'obligation est levée. Sur la base de ce constat, la question de recherche est :

Prendre en compte explicitement le fonctionnement de l'exploitation agricole permet-il d'une part de comprendre l'adoption ou l'abandon des mesures de la politique de l'eau et d'autre part de co-

concevoir des changements cohérents pour les agriculteurs et pour la protection de la qualité des eaux souterraines ?

Dans les travaux en agronomie, économie, mais aussi en géographie que nous avons évoqués, la façon dont les agriculteurs mettent en œuvre ces mesures dans leur exploitation est peu décrite. Nous proposons de porter un regard complémentaire en étudiant la mise en œuvre de ces mesures en mobilisant un cadre d'analyse à l'échelle de l'exploitation agricole représenté par la combinaison de la structure de l'exploitation agricole et la stratégie de l'agriculteur (cf. Figure 1.10). Ce cadre permettra de répondre à la première sous-question de recherche :

Les mesures issues de la politique de l'eau en France sont-elles en adéquation avec le fonctionnement des exploitations agricoles ?

Sur la base des résultats de cette première partie, découle le développement d'une démarche ayant pour objectif de construire des scénarios adaptés au fonctionnement des exploitations agricoles et qui permettent d'atteindre l'objectif de reconquête de la qualité des eaux souterraines (cf. Figure 1.10). Ce choix vise à favoriser le changement à long terme de la part des agriculteurs, nécessaire à la reconquête de la qualité des eaux souterraines. Pour cela, nous avons choisi, dans la deuxième partie de thèse, de répondre à la question suivante :

Comment concevoir et évaluer des scénarios cohérents tant en matière de fonctionnement de l'exploitation agricole que de protection de la ressource en eau souterraine ?

Cette question a une double visée méthodologique (développement d'une méthode de co-conception de scénarios à l'échelle de l'exploitation agricole) et opérationnelle (production de scénarios efficaces vis-à-vis de la protection de la qualité des eaux souterraines et performantes selon les objectifs de l'agriculteur). Elle peut donc se décliner en sous-questions :

- i. Quelle méthodologie développer pour co-concevoir des scénarios en adéquation avec le fonctionnement des exploitations agricoles et préservant la qualité des eaux souterraines ?*
- ii. Quelles sont les performances de ces scénarios en termes d'adéquation avec le fonctionnement des exploitations agricoles et de préservation de la qualité des ressources en eaux souterraines ?*

Le cadre d'analyse à l'échelle de l'exploitation, développé et testé en première partie, sera utilisé tout au long de la démarche participative. Ainsi, l'échelle de l'exploitation agricole est embarquée à chaque étape de ces travaux de thèse. Pour répondre à la question de recherche, nous avons choisi deux cas d'études au sud-est de la France, sur le bassin Rhône-Méditerranée-Corse présentés à la suite.

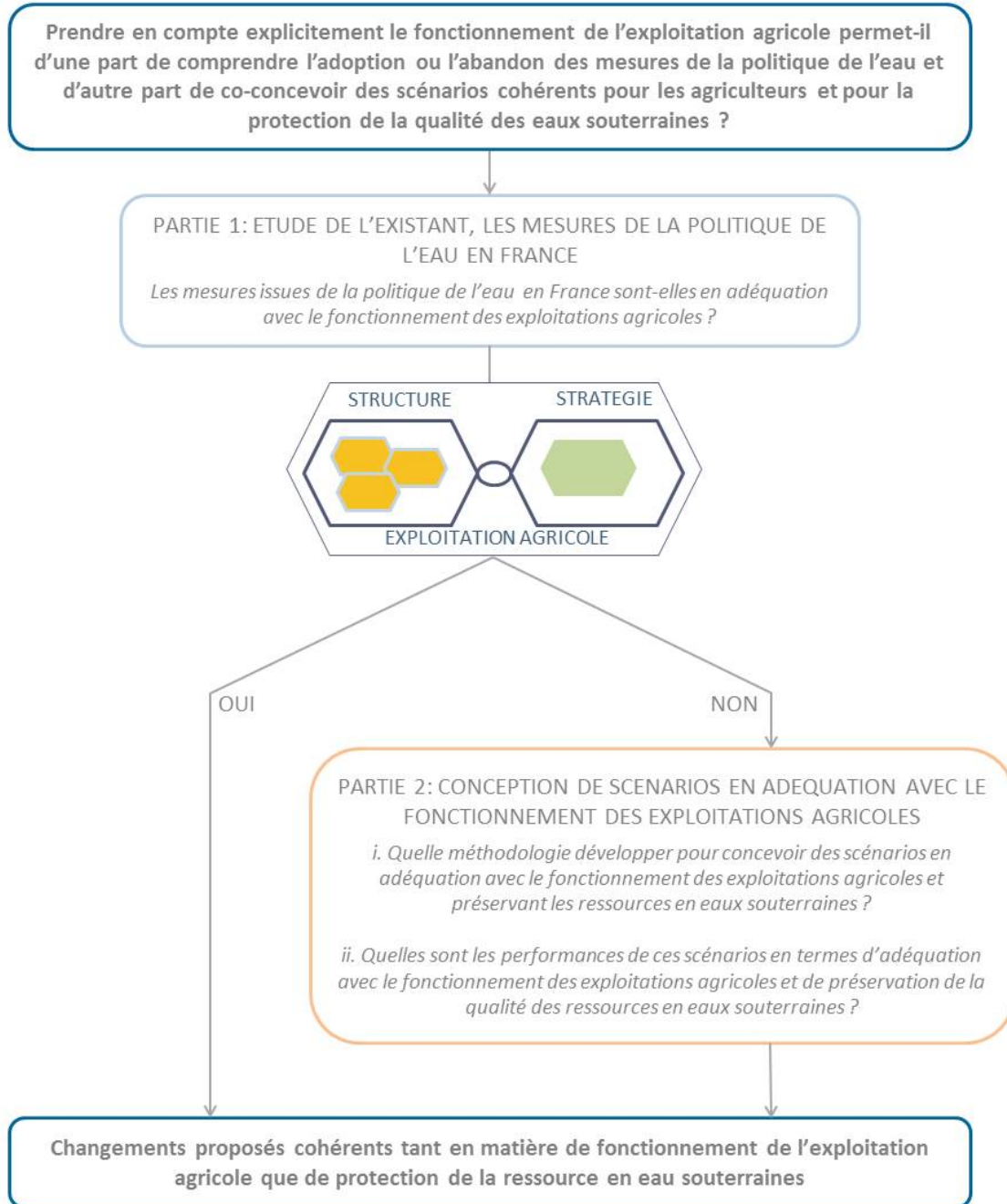


Figure 1. 10: Schéma de l'organisation du manuscrit de thèse composé de deux sous-questions de recherche. Travail de recherche partant du constat des eaux souterraines polluées pour viser la reconquête à long terme de la qualité des eaux souterraines.

Chapitre 2. PRESENTATION DES DEUX CAS D'ETUDE

1. CRITERES DE CHOIX DES TERRITOIRES ETUDIES

Compte tenu de la variabilité des contextes réglementaires et de la diversité des systèmes agricoles rencontrés au sein d'un territoire à enjeu eau, **deux cas d'étude** ont été choisis pour cette thèse. Les objectifs sur ces deux territoires sont doubles : (i) étudier les mesures proposées par la politique de l'eau et leur adoption par les agriculteurs, ensuite (ii) développer une démarche de co-conception avec et par les agriculteurs. La phase de prospection de ces deux cas d'étude a duré plusieurs mois car nous avons été contraints d'abandonner quatre terrains présélectionnés, parfois malgré une étude déjà bien avancée (cf. Tableau 2.1). C'est donc le résultat d'une sélection appuyée sur plusieurs critères que nous allons à présent détailler.

Premièrement, des **marges de manœuvres doivent être possibles** sur le territoire pour diminuer la pollution des eaux souterraines liée aux activités agricoles (i.e. problème de pollution liée aux nitrates ou aux pesticides actuellement autorisés). Les AAC des Éparres (38) (Collombet, 2014) et de Bourg Péronnas (01) (Gratecap, 2014; Vincent, 2016) présentaient des problèmes de pollutions dues à des pesticides, dont l'utilisation est actuellement interdite. Selon ce premier critère, ils ont donc été retirés de la liste des potentiels cas d'étude (cf. Tableau 2.1).

Deuxièmement, une démarche participative nécessite un premier contact avec les acteurs du territoire tels que les organisations professionnelles agricoles (ex. chambres d'agriculture), les collectivités présentes sur le bassin et les syndicats mixtes d'eau potable. Ces acteurs permettent un bon déroulement de la démarche car ils peuvent être ou sont en interaction régulière avec les agriculteurs du territoire à enjeu eau. Suivant ce deuxième critère, l'AAC de Lapeyrouse-Mornay (Gratecap, 2014) qui présentait des **conflits institutionnels** n'a donc pas été retenue, malgré un début prometteur avec l'animateur de captage (cf. tableau 2.1).

Troisièmement, les agriculteurs doivent présenter **une dynamique et une motivation pour faire évoluer leurs pratiques**. Afin de conserver cette dynamique de changement et ne pas les décourager à participer à la démarche de co-conception, il est nécessaire que ces agriculteurs ne soient pas trop sollicités par les acteurs du territoire et institutionnels. Sur un des territoires présélectionnés, l'AAC de l'Est Lyonnais, les agriculteurs étaient déjà très sollicités par l'animateur de captage et la collectivité, maître d'ouvrage. Bien que ces acteurs fussent enclins à collaborer avec nous pour développer une démarche participative, le dynamisme et l'implication dans le processus du maître d'ouvrage et des agriculteurs allaient en s'atténuant. Ce territoire n'a donc pas été sélectionné (cf. tableau 2.1).

Ainsi, les deux terrains d'étude sur lesquels ont été appliqués l'étude des mesures de la politique de l'eau et la démarche participative présentent donc (i) des marges de manœuvre pour reconquérir la qualité des eaux souterraines et une dynamique territoriale qui comprend (ii) une absence de tension institutionnelle et (iii) une intention commune des agriculteurs du territoire à faire évoluer leurs pratiques.

Tableau 2. 1: Présentation des terrains présélectionnés puis retenus ou abandonnés suivant la validation des critères (en rouge = critère non respecté)

Terrain présélectionné	Motifs de pré-sélection	Enjeu eau	Dynamique territoriale	
			Acteurs institutionnels	Agriculteurs
Les Eparres (38)	Étude existante sur les systèmes agricoles (Collombet, 2014)	- Faible enjeu eau, niveau des nitrates autour de 25 à 30mg/L et pesticides interdits encore détectés		
Bourg Péronnas (01)	Travail de recherche existant sur la potentielle conversion en agriculture biologique des agriculteurs (Gratecap, 2014; Vincent, 2016)	- Faible enjeu eau : systèmes majoritairement bien conduits - difficulté de développer systèmes en « rupture » par rapport à l'existant		
Lapeyrouse-Mornay (26)	Contact avec l'animateur de captage et travail de recherche existant sur la potentielle conversion en agriculture biologique des agriculteurs (Gratecap, 2014)	2 captages prioritaires au titre du SDAGE + Fort enjeu nitrates	- conflit institutionnel entre les chambres d'agriculture et l'animateur de captage	
Est Lyonnais (69)	Contact avec l'animatrice des captages	+ 7 captages dont 6 prioritaires. + Enjeu nitrates - Enjeu pesticides faible car détection de pesticides interdits	+ Dialogue établi et apaisé entre institutions + Le maître d'ouvrage est intéressé pour les démarches de co-conception + L'animateur lié à un bureau d'étude qui travaille déjà en R&D et développe des outils de concertation	- Peu d'agriculteurs moteurs et dynamique décroissante car ils sont très sollicités depuis quelques années par le bureau d'étude qui organise des comités de suivis et des enquêtes auprès des agriculteurs
Val de Durance (04)	Étude existante sur les systèmes agricoles (Collombet, 2014)	+ Enjeu pesticides : augmentation de la détection du glyphosate - Enjeu nitrates en baisse	+ Pas de conflit institutionnel + L'animateur de la chambre est intéressé par une démarche participative pour les réseaux DEPHY et CASDAR	- Dynamique de changement déclinant car les agriculteurs de l'AAC ont signé une charte depuis 2010 et ont changé leurs pratiques + Dynamique auprès des agriculteurs du groupe DEPHY
Plaine des Chères (69)	Contact avec l'animatrice captage	+ 3 captages prioritaires + Enjeu nitrates + Enjeu pesticides	+ Dialogue établi et apaisé entre les institutions	+ Agriculteurs sensibilisés et ouverts au changement

2. CARACTERISTIQUES DES DEUX TERRAINS D'ETUDE

Les zones d'étude sont situées sur le bassin Rhône Méditerranée Corse, sur des masses d'eaux souterraines affleurantes qui présentent des enjeux de restauration de la qualité des eaux souterraines (cf. Figure 2. 1). Val de Durance dans le département des Alpes de Haute-Provence (04) et la Plaine des Chères dans le département du Rhône (69) sont les deux cas d'études (cf. tableau 2.2).

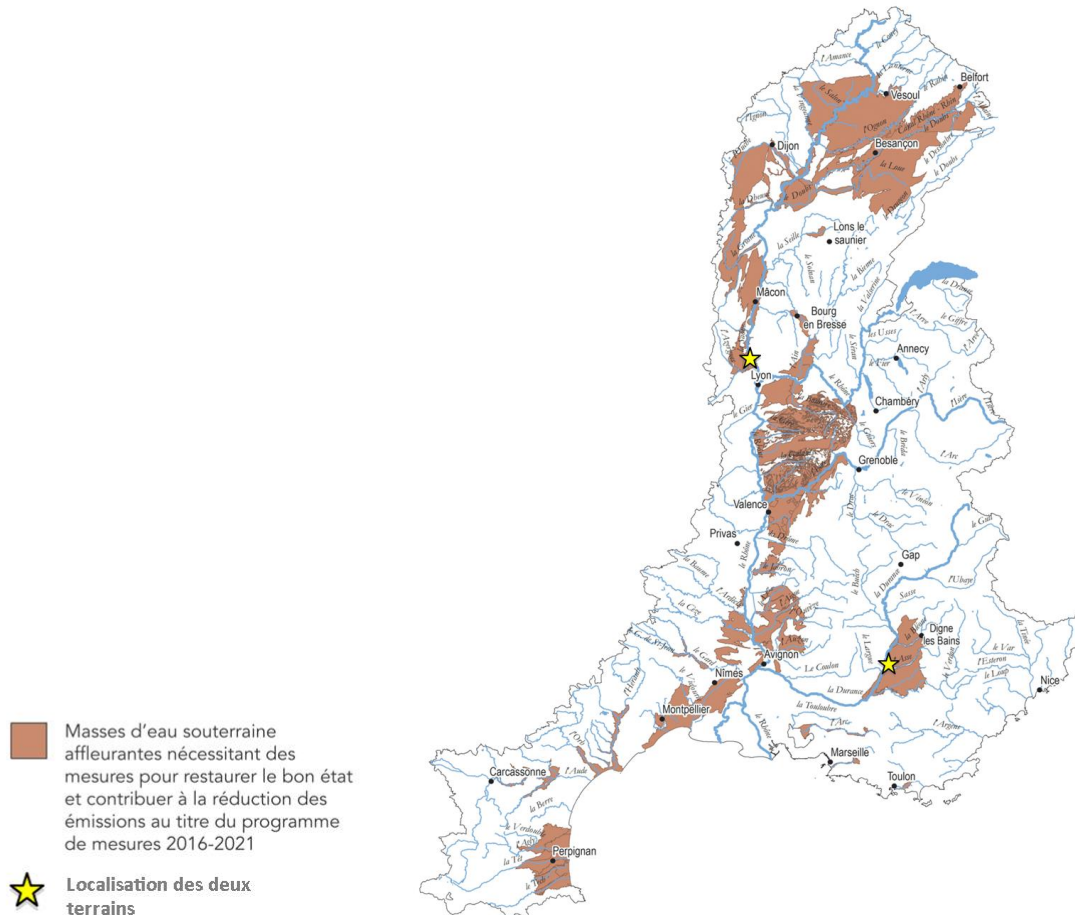


Figure 2. 1: Masses d'eau affleurantes sur le bassin Rhône Méditerranée Corse qui présentent un enjeu de reconquête de la qualité des eaux souterraines et localisation des deux terrains d'étude (source : SDAGE RHONE-MEDITERRANEE 2016-2021, Agence de l'eau)

Ce sont des **zones à enjeu eau** qui se composent d'une ou plusieurs nappes phréatiques. **Val de Durance** présente trois masses d'eau FRDG209, FRDG356 et FRDG357 dont la dernière comprend l'AAC « Hippodrome » (cf. Annexe 1 & cf. Figure 2.2). La **Plaine des Chères** présente notamment plusieurs masses d'eau qui ne forment qu'une seule AAC (cf. Annexe 2).

Les agriculteurs de Val de Durance qui ont participé à la démarche participative, ne sont pas seulement sur l'AAC « Hippodrome » car les AAC voisines (ceux de la commune de Valensole) étaient encore à l'état de délimitation de l'AAC, sans programme d'action proposé aux agriculteurs. La dynamique de changement de la part de ces agriculteurs était optimale pour développer avec eux une démarche participative (cf. Tableau 2.2). Leurs parcelles se situent sur les trois masses d'eau vulnérables et de qualité médiocre (cf. Figure 2. 2).

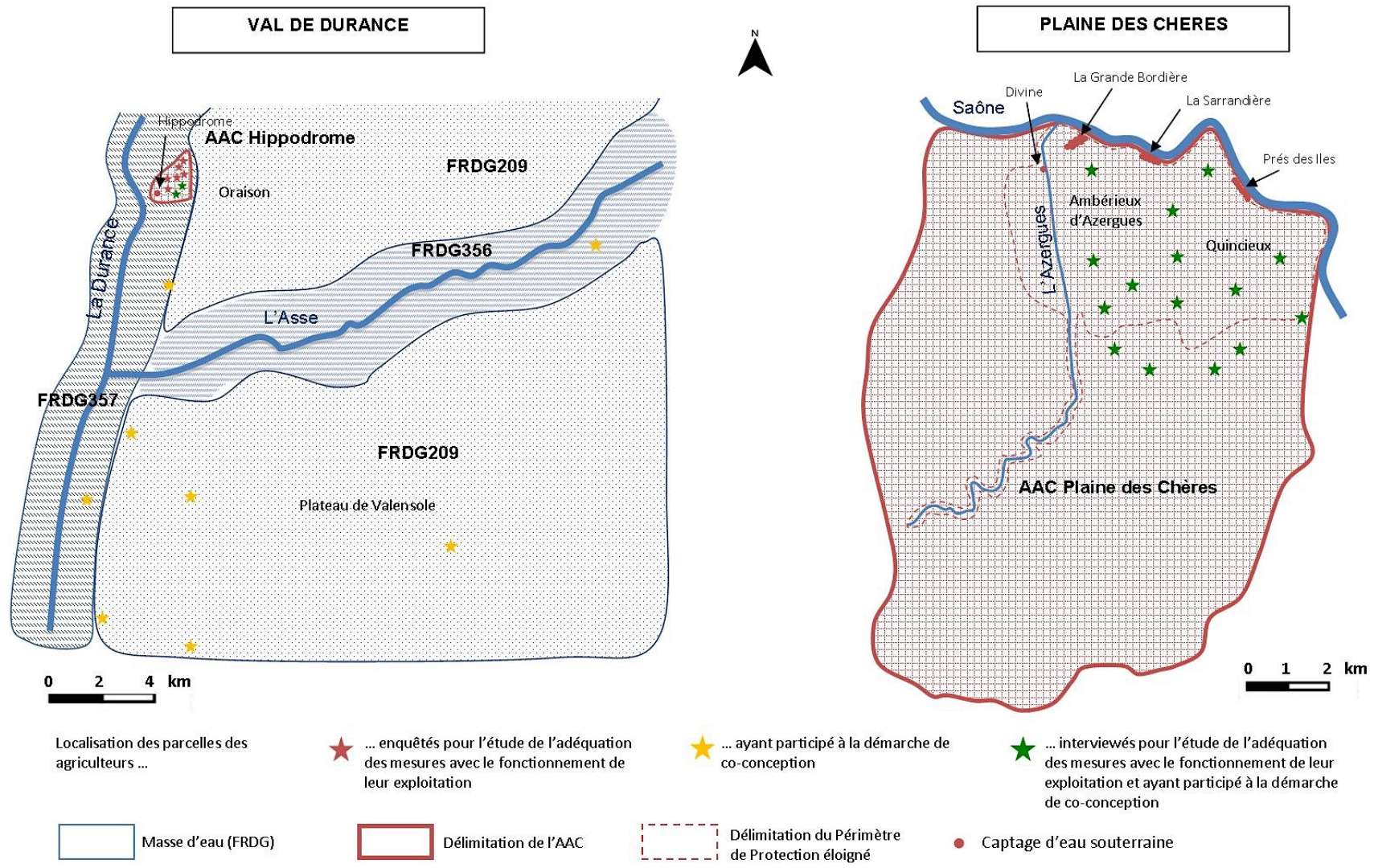


Figure 2. 2: Schéma des deux cas d'étude qui présentent la localisation des parcelles des agriculteurs qui ont été enquêtés pour l'étude de l'adéquation des mesures avec le fonctionnement de leur exploitation et/ou qui ont participé à la démarche participative

Tableau 2. 2: Présentation des deux AAC et leurs caractéristiques

Étude de cas	Val de Durance	Plaine des Chères
Localisation	Département Alpes de Haute Provence (04)	Département du Rhône (69)
Zones à enjeu eau	Masses d'eau FRDG209, FRDG356, FRDG357 (dont AAC Hippodrome)	AAC « Plaine des Chères »
Vulnérabilité	Forte	Forte
Pollution	Nitrates et pesticides	Nitrates et pesticides
AAC	AAC « Hippodrome »	AAC « Plaine de Chères »
Nombre de captages	1	3
Niveaux de pollution nitrates	40 mg/L	30 mg/L
Pollutions en pesticides	Pollution résiduelle en Atrazine	Pollution résiduelle (2-4D)
Surface agricole/surface AAC (ha)	296 ha	11 247 ha
Zone d'Intervention Prioritaire	296 ha	2 900 ha
SAU sur l'AAC ou ZIP	263 ha	1800 ha
Nombre d'agriculteurs enquêtés/nombre total la ZIP	8/8	14/40
Communes concernées	Oraison	Anse, Quincieux, Ambérieux, Morancé, Lucenay, Les Chères, Chazay, Marcilly, Chasselay, Civrieux, Lozanne
Désignation en Zone Vulnérable Nitrate	Oui [2012-2016]	Oui, [1997-2017]
Groupes d'agriculteurs	Groupe d'agriculteurs 1	Groupe d'agriculteurs 2
Nombre total d'agriculteurs	11 dont 2 sur l'AAC Hippodrome	14
Systèmes de production	Grandes cultures, lavandin, olivier et élevage	Grandes cultures, arboriculture et élevage
Acteurs territoriaux principaux	Arvalis, Agribio	OPA (Terres d'Alliance)
Co-animateur	Animatrice du réseau DEPHY	Aucun

3. ÉTUDE DES MESURES DE LA POLITIQUE DE L'EAU : DEUX CAS D'ETUDE SUR DES AAC AUX CONTEXTES REGLEMENTAIRES SIMILAIRES

3.1 Val de Durance : caractéristiques de ses masses d'eau et de l'AAC « Hippodrome »

Val de Durance présente trois masses d'eau (cf. Tableau 2.2). La **masse d'eau FRDG209** est liée à la formation du plateau de Valensole. Elle présente des captages qui ont été largement contaminés par des pesticides liés à la culture de lavandin, malgré l'interdiction de certains pesticides depuis 10 ans. De cette pollution, sept captages ont été abandonnés et six sont « prioritaires » au titre du SDAGE 2016-2022. Cette masse d'eau représente la limite sud et nord de la masse d'eau des alluvions de l'Asse, **FRDG356**. Cette

nappe alluviale peu profonde (2 à 5 mètres par rapport au sol) est en liaison hydraulique avec la rivière l'Asse. Compte tenu de la forte perméabilité des alluvions, les **eaux souterraines sont fortement vulnérables** aux éventuelles pollutions de surface. L'Asse est un affluent de la Durance, qui est notamment en liaison hydraulique avec sa nappe alluviale peu profonde, **FRDG357** (2 à 10 mètres par rapport au sol). Cette masse d'eau, des alluvions de la moyenne Durance, présente une forte vulnérabilité vis-à-vis des pollutions de surface (pesticides et nitrates). L'occupation générale des sols présente 61% de terres arables et cultures diverses. La pression sur la qualité des eaux souterraines est donc importante. Sur la période 2006-2011, treize points de surveillance pour les nitrates ont été suivis et quatre présentaient des indices de dégradation avec des tendances à la hausse. Concernant les pesticides, trois sur les onze points présentaient un état médiocre avec la présence d'atrazine. Parmi ces points de suivi se trouve le **captage Hippodrome** et donc l'AAC associée.

Sur Val de Durance, nous avons étudié la vulnérabilité de la nappe phréatique qui alimente le captage « Hippodrome » et l'occupation spatiale de l'AAC. Cela permet de comprendre l'état des lieux de sa pollution et les démarches réglementaires mis en place pour l'endiguer.

La nappe de l'AAC d'Oraison, **d'une superficie de 296 ha** (cf. Tableau 2.2) est comprise dans la masse d'eau des alluvions de la Durance (cf. figure 2.2). Cette nappe alluviale est pourtant peu alimentée par la *Durance* mais majoritairement par l'eau des parcelles situées au-dessus de la nappe (Envilys, 2009). Le risque d'infiltration est assez élevé pour toute la zone, seul l'intervalle de temps afin d'arriver jusqu'à la nappe varie. La nappe alluviale est donc **très vulnérable par rapport aux pollutions diffuses (nitrates et pesticides)**.

Le climat est méditerranéen, caractérisé par une période de sécheresse longue et fréquente durant l'été et des précipitations annuelles qui varient de 720mm à 400mm (en 2017⁹), lié au réchauffement climatique. Le canal d'EDF, qui dévie la majeure partie des écoulements de la Durance surplombant la vallée, permet d'acheminer l'eau d'irrigation aux agriculteurs de l'AAC. Les **surfaces agricoles toutes irriguées** couvrent **89% de cette AAC** avec 8 agriculteurs cultivant sur cette zone (cf. Figure 2.4). L'agriculture est très spécialisée en production céréalière, avec majoritairement du **blé dur et du maïs irrigué** (71% de la surface), et des cultures de semences telles que la betterave et le colza. Du fait d'une sécheresse en été de plus en plus longue, certains agriculteurs ont arrêté la culture de maïs.

L'omniprésence passée de la culture de maïs explique que la nappe présentait des concentrations élevées en Atrazine, herbicide utilisé en maïs, qui dépassaient les normes DCE. Du fait de son interdiction, le problème d'Atrazine semble se résoudre mais les molécules qui présentent une mobilité importante, telles que le Glyphosate et le Diquat doivent faire l'objet d'une attention particulière (Envilys, 2009). Concernant les nitrates, la nappe est affectée par une contamination chronique en nitrates avec une teneur stable depuis mi-2005 à 40mg/L.

Ainsi, les fortes concentrations en pesticides et nitrates qui affectent le captage Hippodrome, et son importance stratégique (il pourvoit 900 milliers de m³ d'eau potable par an), l'ont fait désigner **« prioritaire »** au titre de la politique Grenelle en 2009 et au titre du SDAGE en 2010 (cf. Figure 2.3).

⁹ <http://www.linternaute.com/voyage/climat/provence-alpes-cote-d-azur/region-93>

Il bénéficie donc d'une démarche de protection accrue qui repose sur trois phases successives : (1) la délimitation hydrogéologique de l'AAC, (2) un diagnostic territorial des pressions agricoles (DTPA) et (3) l'écriture d'un programme d'actions (cf. Figure 2.3). Ce captage a pour maître d'ouvrage la communauté d'agglomération 'Durance Luberon Verdon' (DLVA) qui a mis en place une usine de traitement de l'eau suite au dépassement de la norme en Atrazine et Nitrates.

Suite au DTPA, un processus participatif et réglementaire s'est développé et **une charte** a été proposée en 2011 aux agriculteurs (cf. Figure 2.3). Elle définit des actions sur lesquelles se sont **engagés individuellement les exploitants agricoles** et présentées ci-dessous :

- Diversification de l'assolement
- Gestion raisonnée des intrants
- Mesure des reliquats azotés du sol
- Pilotage de la fertilisation azotée sur blé dur
- Pilotage de la fertilisation azotée sur maïs
- Création d'une aire collective de remplissage des pulvérisateurs
- Formations à différentes techniques agricoles

Actuellement sept exploitants agricoles parmi les huit présents sur l'AAC, ont signé cette charte. Le huitième ne l'a pas signé, car s'y est installé après la mise en place de la charte.

En parallèle, depuis 2012, la commune d'Oraison, qui comprend l'AAC « Hippodrome », a été **désignée comme zone vulnérable nitrate (ZVN)**. Les exploitants agricoles de cette commune sont donc soumis aux mesures de la directive nitrates (cf. Tableau 2.4).

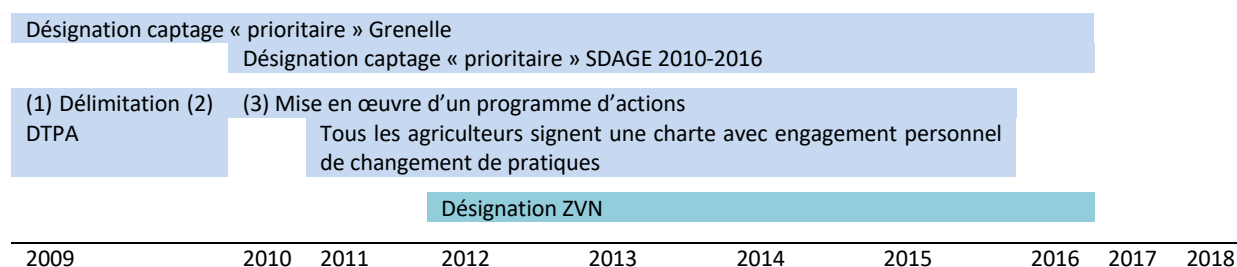


Figure 2. 3: Chronologie des démarches réglementaires du cas d'étude 1

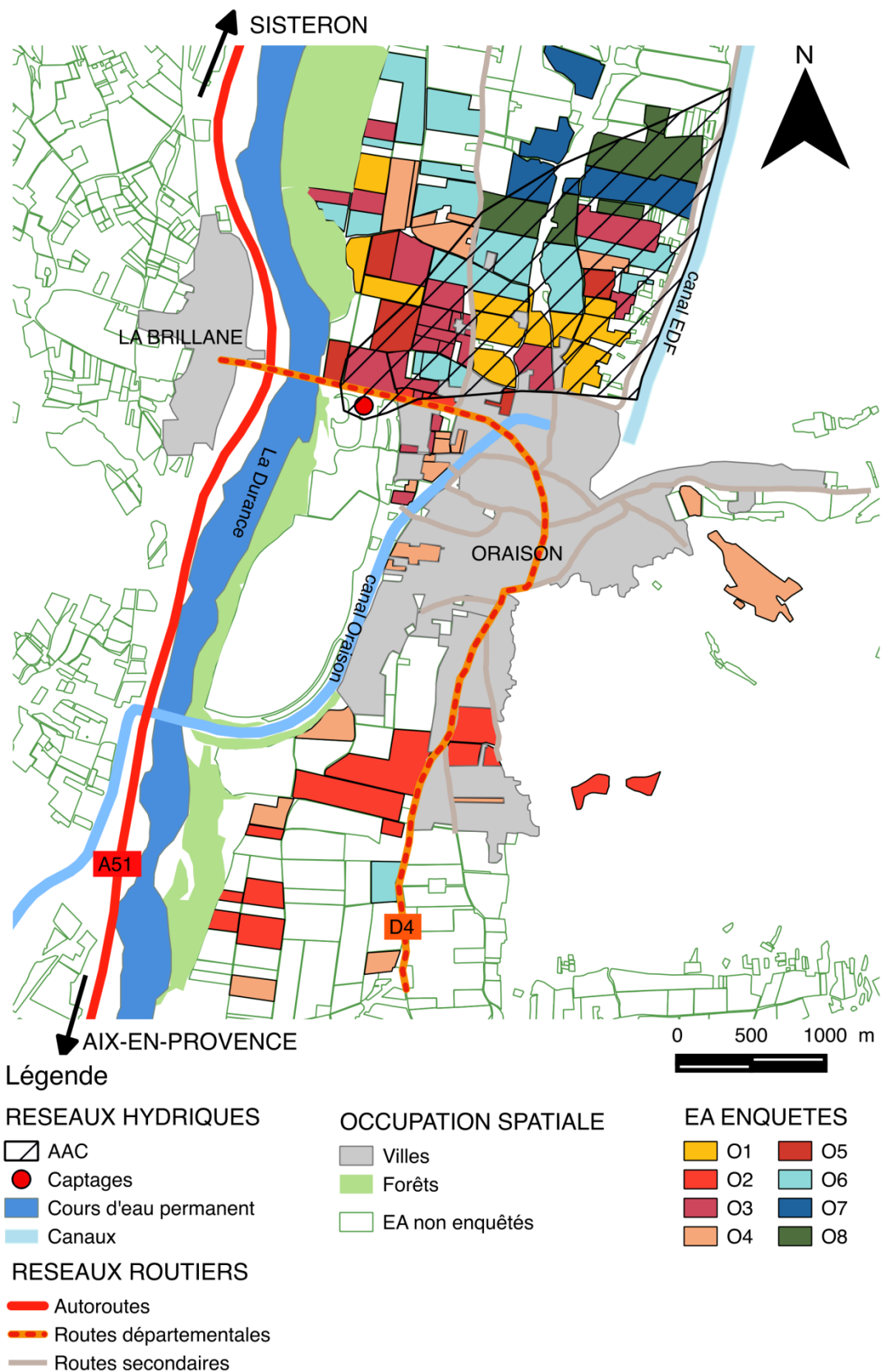


Figure 2. 4: Aire d'Alimentation du Captage « Hippodrome » et le parcellaire des exploitants agricoles (EA) enquêtés (Source : enquêtes et Registre Parcellaire Graphique (04), Annabelle Richard)

3.2 Plaine des Chères : caractéristiques de son AAC

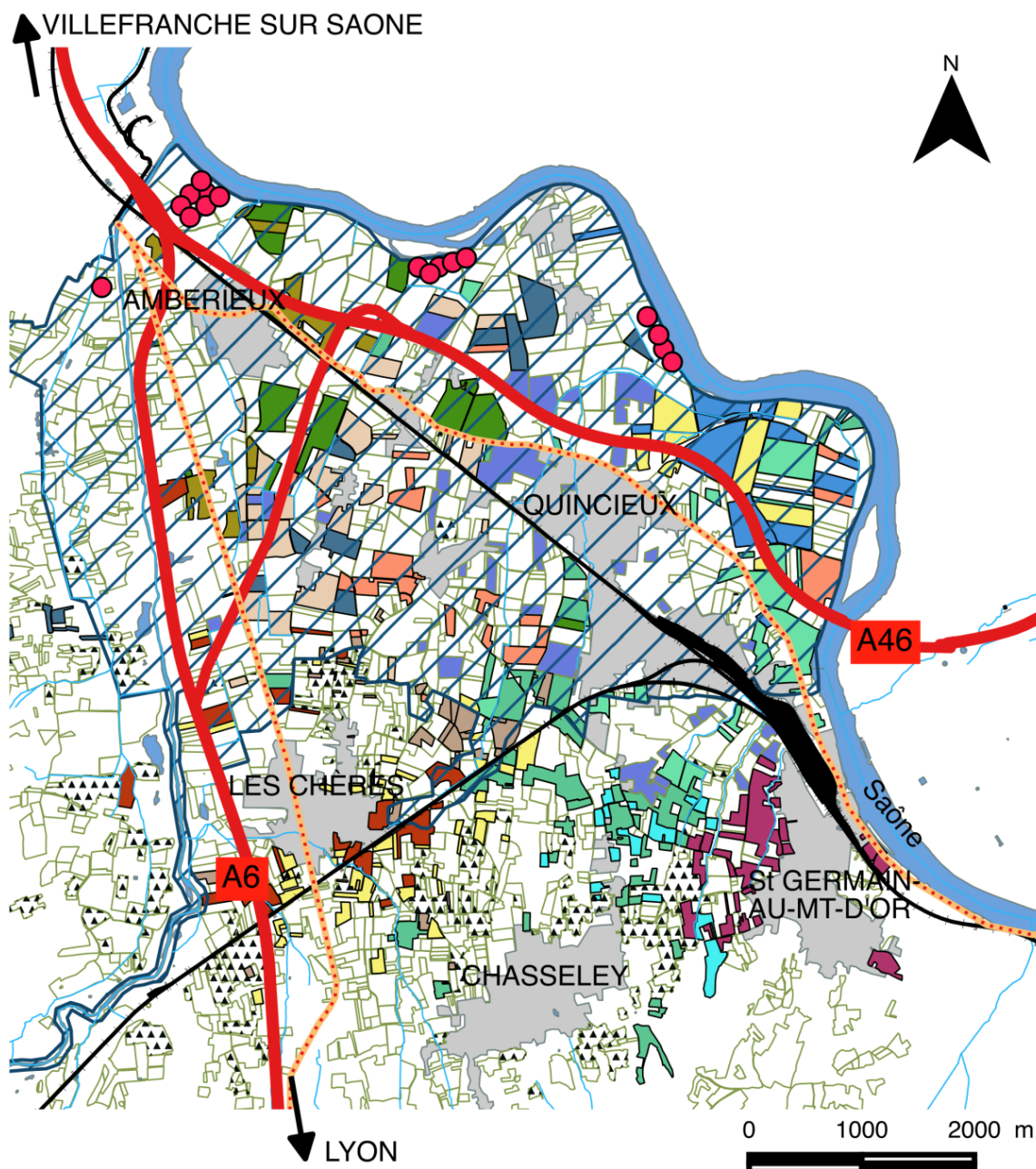
Sur la Plaine des Chères, nous avons étudié la vulnérabilité des eaux souterraines de l'AAC et son occupation du sol qui permet d'expliquer les enjeux de pollution actuelle de ce cas d'étude et les démarches réglementaires mises en place pour limiter cette pollution.

Cette AAC, d'une superficie de **11 247 ha**, est exploitée par **plusieurs champs captants** (regroupant plusieurs ouvrages de captage d'eau potable souterraine) – la « Grande Bordière », la « Sarrandière », le « Pré-aux-îles » et le « Divin » – qui constituent le bassin d'alimentation des captages géré par le syndicat Saône-Turdine. **La vulnérabilité de la nappe** aux abords immédiats des champs captants **semble forte**, du fait d'une importante pression de l'occupation des sols agricoles ou urbains (SMEP Saône-Turdine, 2011). **Une zone de protection de 1 815ha** a donc été délimitée correspondant à la zone de vulnérabilité la plus importante de la zone (cf. Figure 2.6 et Annexe 2). Sur cette zone d'intervention prioritaire (ZIP), il y a environ quarante exploitants agricoles cultivant majoritairement des grandes cultures (73% de la SAU) et en particulier du maïs ; des prairies (14%) ; des cultures maraîchères (5%) ; de l'arboriculture et pépinières (5%) (EPTB Saône & Doubs, 2014).

Le climat est continental et la pluviométrie moyenne interannuelle est de l'ordre de 740 mm par an. Les pluies sont prédominantes au mois d'août et aux mois d'octobre/novembre, ce qui augmente les risques de lixiviation des pesticides et nitrates épandus en automne. Elles sont faibles en hiver de décembre à février, puis augmentent régulièrement au printemps.

Du fait de l'occupation du sol majoritairement agricole aux abords des captages, les principales matières actives retrouvées sont la Déséthyl-atrazine et l'Atrazine, à des concentrations parfois supérieures à la norme. La somme des pesticides présents dans l'eau captée du « Divin » est en moyenne assez proche de la norme sanitaire de 0,5µg/l (en 2008, une valeur a dépassé cette norme). La principale matière active présente est l'oxadixyl, fongicide interdit depuis 2003, à des concentrations supérieures à la norme de 0,1 µg/l. Ce pesticide tend cependant à diminuer. Concernant les nitrates, la concentration, pour la « Grande Bordière », la « Grande Sarrandière » et « Pré aux îles », présente une légère tendance à l'augmentation, de 4 à 12mg/L, entre 1997 et 2010, contrairement au Divin qui présente une nette augmentation de 24 mg/L à 41 mg/L en 2009. Cette variabilité trouve son origine dans l'intensification de l'exploitation de la nappe qui entraîne une forte altération du mécanisme de dénitrification bactérienne liée à la captivité de la nappe.

Cette pollution et l'utilisation stratégique de ces captages (ils alimentent en eau potable 115 000 usagers (SMEP Saône-Turdine, 2011), ont conduit à la désignation de ces captages comme « **prioritaires** » au titre **SDAGE**. La « Grande Bordière », « Sarrandière » et « Prés-aux-îles » figurent notamment dans la liste nationale, issue des travaux du Grenelle de l'Environnement, des 507 captages parmi les plus menacés par les pollutions diffuses (cf. Figure 2.5). Le maître d'ouvrage porteur de l'animation de ce programme, d'application volontaire, est l'Établissement Public Territorial de Bassin Saône-Doubs (EPTB). Un DTPA a été établi par le bureau d'étude TAUW pour identifier les enjeux agricoles et les pistes d'action adaptées. Le programme d'actions, validé par Arrêté Préfectoral (n°2014- A50), prévoit des mesures relatives à la gestion des intrants, les fertilisants azotés comme les pesticides (cf. Figure 2 .5).



Légende

RESEAUX HYDRIQUES

- Périimètre de Protection éloigné
- Captages
- Cours d'eau permanents
- Cours d'eau intermittents

RESEAUX DE TRANSPORT

- Autoroutes
- Routes départementales
- Voies ferrées

OCCUPATION SPATIALE

- Villes
- EA non enquêtés
- Verger

EA ENQUETES

- | | |
|-----|----|
| A14 | A7 |
| A13 | A6 |
| A12 | A5 |
| A11 | A4 |
| A10 | A3 |
| A9 | A2 |
| A8 | A1 |

Figure 2. 5: Aire d'Alimentation « Plaine des chères » et le parcellaire des exploitants agricoles (EA) enquêtés (Source : enquêtes et Registre Parcellaire Graphique (04), Annabelle Richard)

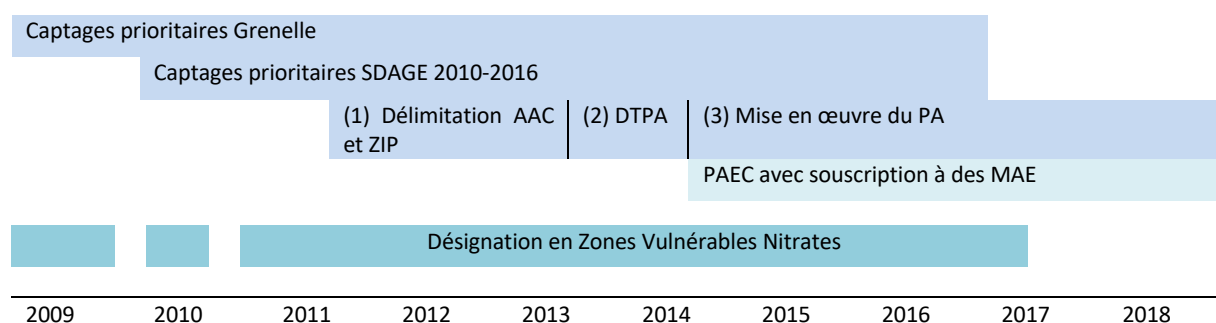


Figure 2. 6: Chronologie des démarches réglementaires du cas d'étude 1

Concernant la gestion des fertilisants azotés, les mesures sont semblables à celles du programme d'actions de la DN (cf. Tableau 2.4). Dans le cas de la gestion des produits phytosanitaires, cela comprend (i) une recherche de substitution de molécules, (ii) la réduction progressive de l'Indice de Fréquence de Traitement Herbicide et Hors Herbicides (IFT, IFTHH) sur la ZIP et (iii) la limitation des pollutions ponctuelles par un aménagement des zones de rinçage, un diagnostic des pulvérisateurs. Ce programme comprend notamment une mesure de remise en herbe (cf. Tableau 2.3: occupation du sol), le développement des zones tampons et l'entretien du réseau de fossés dans la ZIP (cf. Tableau 2.3: Aménagement et gestion de l'espace). Actuellement, les exploitants agricoles rencontrés n'ont pas ou peu connaissance des mesures écrites dans le cadre du PA, elles ne sont par ailleurs pas obligatoires. Cette ZIP est notamment retenue dans un Projet Agro-Environnemental et Climatique (PAEC) du Val de Saône en Rhône-Alpes (cf. Figure 2.6) et bénéficie de campagnes d'animation relatives à la contractualisation de Mesures Agro-Environnementales Territoriales (MAET) (EPTB Saône & Doubs, 2014). Sept MAET sont proposées aux exploitants agricoles de la ZIP dont cinq autour de la réduction des traitements phytosanitaires, une sur la remise en herbe et une sur la lutte biologique (cf. Tableau 2.3). Six agriculteurs sur les 40 agriculteurs de la zone prioritaire ont souscrit à une ou plusieurs MAET depuis 2017 (cf. Tableau 2.3). Enfin, certaines communes de l'AAC sont en zone vulnérable nitrate et par conséquent les agriculteurs de ces communes sont tous soumis au programme d'actions de la Directive (cf. Tableau 2.3).

Tableau 2. 3: Présentation du contenu du PA de l'AAC « Plain des Chères » et du PAEC Val de Saône

ORIGINE			
REGLEMENTAIRE	DATE	CONTENU	
PA	2014	Enregistrement des pratiques, suivi et valorisation des données	
PA	2014	Pilotage de la fertilisation	
PA	2014	choix du couvert hivernal	
PA	2014	gestion des produits phytosanitaires	
PA	2014	Limitation du risque de pollutions ponctuelles avant et après traitement	
PA	2014	Occupation du sol	
PA	2014	Aménagement et gestion de l'espace	
PAEC	2014	Absence de traitements herbicides en arboriculture	
PAEC	2014	Réduction progressive de l'IFT herbicides de 25%	31ha, 1 contrat souscrit
PAEC	2014	Réduction progressive de l'IFT herbicides de 40%	75ha, 1 contrat souscrit
PAEC	2014	Réduction progressive de l'IFT hors herbicides de 30%	
PAEC	2014	Réduction progressive de l'IFT hors herbicides de 50%	31ha, 1 contrat souscrit
PAEC	2014	Lutte biologique	151 ha, 3 contrats souscrits
PAEC	2014	Création et entretien d'un couvert herbacé	28ha, 3 contrats souscrits

3.3 Contexte réglementaire identique : la directive nitrates

Ces deux AAC sont désignées comme **zones vulnérables nitrates**, pour la prévention et la réduction des nitrates d'origine agricole dans les eaux. Sur ces zones, les programmes d'actions ont un caractère obligatoire auprès des agriculteurs qui cultivent sur ces dernières. Un **programme d'actions régional** Rhône-Alpes se compose d'un ensemble de mesures nécessaires à une bonne maîtrise des fertilisants azotés et à une gestion adaptée des terres agricoles (cf. Tableau 2.4). On distingue parmi ces **neuf mesures**, trois catégories : (i) les mesures qui suivent une logique de couverture des sols (*Couvert, Mulch, Bande*) ; (ii) les mesures qui permettent un meilleur raisonnement de la fertilisation (*PlanN, SolN, FertiN*) et enfin (iii) les mesures qui ont des restrictions spatiales (*Zone, Stock*) et temporelles (*Période*).

Tableau 2. 4: Présentation des mesures réglementaires issues de la DN du programme d'action
Contenu spécifique des mesures par terrain d'étude

Code	Mesures étudiées	AAC	
		Hippodrome	Plaine des Chères
Couvert	Couvrir ses sols en interculture	Les parcelles doivent être couvertes en hiver après une récolte avant le 1 ^{er} octobre.	
Mulch	Couvrir ses sols en interculture	Broyage et enfouissement superficiel ou profond des résidus de maïs, tournesol et sorgho dans les 15 jours suivant la récolte	
Bande	Planter une bande enherbée en bord de cours d'eau	Bande enherbée de 5 mètres doit être implantée le long des cours d'eau représentés par des traits pleins et pointillés nommés sur carte IGN et des plans d'eau sur IGN	
PlanN	Enregistrer ses pratiques	Tenue obligatoire d'un Plan Prévisionnel de Fertilisation et d'un cahier d'enregistrement des pratiques	
Reliquat	Équilibrer sa fertilisation	Réaliser une analyse de sol ou reliquat azoté sortie hiver par an pour toute exploitation ayant plus de 3ha en zone vulnérable nitrate	
FertiN	Équilibrer sa fertilisation	Les apports doivent être strictement équilibrés avec les besoins culturaux et la quantité d'azote épandable par les effluents d'élevage est de 170kg N tot/ha/an maximum	
Période	Respecter les périodes d'interdiction d'épandage	Interdiction d'épandre avant le 15.01 pour les cultures implantées à l'automne ou fin d'été	Interdiction d'épandre avant le 31.01 pour les cultures implantées à l'automne ou fin d'été
Stockage	Avoir un stockage adapté pour les effluents	Pas d'élevage	Avoir un ouvrage étanche avec une capacité de stockage à définir selon UGB, espèces...
Zone	Respecter les conditions d'épandage	Pas de zone rapprochée autour du captage	Ne pas épandre d'effluents d'élevage sur parcelles en zone rapprochée

4. DEMARCHE PARTICIPATIVE : DEUX GROUPES D'AGRICULTEURS AVEC DES DYNAMIQUES CONTRASTEES

Les deux groupes d'agriculteurs situés chacun sur un cas d'étude montrent une **dynamique contrastée** face au changement de leurs pratiques.

En Val de Durance, nous avons recruté les agriculteurs d'un réseau DEPHY, animé par la conseillère de la chambre d'agriculture d'Oraison (04), Elsa CLUZEL. Ce réseau a pour objectif de développer de nouvelles techniques afin de réduire l'utilisation des pesticides. Les dix agriculteurs qui ont accepté de participer au réseau DEPHY ont donc des **vellités de changement** qui permettent de garantir une participation régulière à la démarche participative. Ces dix agriculteurs ont en commun une **sensibilisation à la qualité des sols** recherchant une limitation du labour. Six d'entre eux sont en agriculture de conservation et pratiquent le semis direct sous couvert végétal et deux agriculteurs présentent un système en polyculture-élevage (cf. Tableau 2.5). Ils ont tous dans leur système, des cultures à haute valeur ajoutée comme les cultures de semences ainsi que des Plantes à Parfum, Aromatiques et Médicinales (PPAM). Malgré une **sensibilisation commune pour la protection de l'environnement**, les objectifs qui guident les choix des exploitants sont variés. L'objectif de réduction des charges concerne quatre agriculteurs contrairement à l'objectif d'amélioration de la qualité des sols et de la diminution des intrants qui en concerne deux. En parallèle de ce réseau DEPHY, des agriculteurs ont été « invités » pour apporter des savoirs locaux lors des ateliers, comme deux agriculteurs qui présentent un système en agriculture biologique et un qui développe son système agroforestier.

Tableau 2. 5: Caractéristiques des groupes d'exploitations agricoles participant à la démarche participative

Caractéristiques	Classes	Nombre d'agriculteurs	
		Val de Durance	Plaine des Chères
Systèmes agricoles	Conventionnel	8	14
	Bio ou en conversion bio	2	0
Travail du sol	Semi Direct sous couvert végétal	6	3
	TCS	4	4
	labour		7
Activité principale	Grandes Cultures	8	8
	Polyculture-Élevage	2	6
Activités secondaires	Maraîchage	3	3
	Arboriculture	4	4
	PPAM	6	0
	Production de semences	10	2
Surface Agricole Utile (ha)	<50	1	2
	50-100	3	10
	>100	6	2
Unité de travail humain	1	6	5
	2	2	5
	>3	2	4
Age des exploitants	<50	6	8
	>50	4	6
Stratégie principale	Réduction des intrants	2	1
	Amélioration de la qualité des sols	3	3
	Rigueur technique	0	1
	Diminution des charges/Augmentation de la marge	4	9
	Diminution du temps de travail	1	0

Sur la Plaine des Chères, il s'agit de recruter les agriculteurs qui cultivent sur la zone prioritaire de l'AAC. L'échantillon des agriculteurs pour la démarche participative est identique à celui pour l'étude des mesures de la politique de l'eau. Ces quatorze agriculteurs présentent une diversité de système agricole. Six agriculteurs ont un système en **polyculture-élevage**, associé à un élevage bovin, ovin, avicole ou d'escargots. On observe notamment la présence d'atelier parallèle à celui des grandes cultures (maraîchage et arboriculture) pour la moitié environ des exploitations de l'échantillon (cf. Tableau 2.5). Ils ont majoritairement des surfaces moyennes comprises entre 50 et 100ha étant sur une zone péri-urbaine à forte pression foncière. Ces agriculteurs sont moins sensibles à la protection de l'environnement que ceux de Val de Durance. Un seul agriculteur présente un objectif de réduction des intrants. Leur principal objectif est majoritairement la **réduction des charges (9 agriculteurs)**. Trois agriculteurs, qui sont en agriculture de conservation, ont comme objectif principal **l'amélioration de la qualité des sols** et un agriculteur, installé depuis 1980, présente un objectif de rigueur technique qui sous-entend de faire un travail agricole propre et précis.

Chapitre 3. EVALUATION DE L'ADEQUATION DES MESURES ISSUES DE LA POLITIQUE DE L'EAU AVEC LE FONCTIONNEMENT DES EXPLOITATIONS AGRICOLES

Dans ce troisième chapitre, on cherche à analyser **l'adéquation ou non des mesures proposées** dans le cadre réglementaire de la protection de la qualité des eaux souterraines, avec le fonctionnement des exploitations agricoles présentes sur les territoires à enjeu eau.

Cette étape est primordiale, car il est intéressant **d'identifier les cohérences et contradictions** des mesures proposées pour protéger la qualité des eaux souterraines avec les systèmes agricoles compte tenu de leur diversité. Cette étape permettra, dans un second temps, d'orienter la recherche de **scénarios adaptés aux enjeux et contraintes propres à chaque type d'exploitation agricole**.

Cette partie fait l'objet d'un article publié en mars 2018 dans « Land Use Policy » qui présente les résultats de l'analyse sur la Plaine des Chères. Cet article est orienté sur la présentation d'une nouvelle méthodologie illustrée par un cas d'étude présentant le plus de diversité de systèmes agricoles. Les résultats de l'AAC d'Oraison, en Val de Durance, sont présentés à la suite et suivis d'une discussion transversale englobant les deux AAC.

1. ÉTUDE DE L'ADEQUATION DES MESURES DE LA POLITIQUE DE L'EAU AVEC LE FONCTIONNEMENT DES EXPLOITATIONS AGRICOLES DE L'AAC DE LA PLAINE DES CHERES

An innovative method to assess suitability of Nitrate Directive measures for farm management

Annabelle Richard¹, Marion Casagrande², Marie-Hélène Jeuffroy³, Christophe David¹

¹ISARA Lyon, Département Agroécologie et Environnement, Université de Lyon, 23 Rue Baldassini 69364 Lyon, France

²ITAB - Institut Technique de l'Agriculture Biologique, Ferme Expérimentale, 2485 route des Pécolets 26800 Etoile sur Rhône, France

³UMR Agronomie, INRA-AgroParisTech-Université Paris Saclay, Bâtiment EGER, 78 850 Thiverval-Grignon, France

1.1 Résumé/Abstract

Résumé

Reconquérir et protéger la qualité des eaux souterraines des pollutions diffuses issues des activités agricoles est un enjeu important qui retient une attention particulière de la part de l'Union Européenne depuis 25 ans. La DN européenne et ses ZVN associées ont été récemment révisés en France en 2015, demandant aux agriculteurs d'adopter les mesures qui implique une modification de leurs pratiques pour protéger les ressources en eau. Néanmoins, ces mesures ne sont pas systématiquement mises en œuvre de manière optimale, limitant ainsi une reconquête de la qualité des eaux souterraines. Reposant sur des entretiens avec 14 agriculteurs, nous avons développé une méthode innovante d'analyse à l'échelle de l'exploitation agricole et composée de quatre étapes. Premièrement, nous avons décrit la manière dont les agriculteurs ont mis en œuvre les mesures de la DN dans leur exploitation. Deuxièmement, nous avons évalué leur impact structurel et troisièmement leur cohérence avec la stratégie des agriculteurs. Quatrièmement, nous avons estimé leur adéquation avec le fonctionnement des exploitations agricoles comme étant une analyse intégrant les étapes précédentes. A travers cette approche, nous avons identifié 3 types d'exploitations agricoles. Le type I, « Au-delà de la réglementation », est composé d'agriculteurs dont les mesures de la DN sont en adéquation avec le fonctionnement de leur exploitation. Ils les mettent en œuvre de manière optimale pour protéger la qualité des eaux souterraines. Pour le type II, « Peu Contraints par la Réglementation », les mesures de la DN sont moins en adéquation avec le fonctionnement de leur exploitation car ayant une autre activité lucrative que l'atelier grandes cultures. Ce type d'exploitation pourrait bénéficier d'une réécriture des mesures, orientée sur une obligation de résultat plutôt que de moyen, permettant de prendre en compte les conditions locales et les contraintes de leur exploitation. Pour le type III, « Fortement contraints par la Réglementation », les mesures de la DN ne sont pas en adéquation avec le fonctionnement de leur exploitation. La manière dont ils les mettent en

œuvre n'est pas optimale pour protéger et reconquérir la qualité des eaux souterraines. Nous suggérons qu'investir dans un programme de « formation-action » pour ce type d'exploitation, permettrait de leur faire comprendre l'intérêt et les bénéfices environnementaux de ces mesures et les aider à mettre en œuvre ces mesures de façon cohérente avec le fonctionnement de leur exploitation. Cette méthode d'analyse à l'échelle de l'exploitation agricole pourrait être utilisée par les acteurs de l'eau afin (i) d'évaluer l'adéquation des mesures de la Politique de l'eau avec la diversité de fonctionnement des exploitations agricoles ou (ii) d'orienter la conception de mesures en adéquation avec cette diversité.

MOTS CLÉS : Directive nitrates ; fonctionnement de l'exploitation agricole ; adéquation ; impact structurel ; cohérence stratégique

Abstract

Controlling groundwater diffuse pollution induced by agricultural practices remains a significant challenge and has been receiving strong attention in the European Union (EU) for the last 25 years. The EU's Nitrates Directive (91/676EC) and its associated Nitrates Vulnerable Zone legislation were recently revised in France in 2015, requiring farmers to adopt measures and then modify their agricultural practices to protect water resources. Yet these measures are not always implemented in an optimal way, thus limiting improvement of groundwater quality. Based on semi-directive interviews with 14 French farmers, we developed an innovative farm-scale method composed of four steps. First, we described how these farmers implemented Nitrate Directive measures. Second, we evaluated their impact on farm structure and third their consistency with farmer's strategy. Fourth, we assessed their suitability for farm management as an integrative analysis of the previous step. Through this approach, we identified 3 types of farm management. A group of "Beyond Regulation" composed of farmers for whom Nitrate Directive measures are suitable for their farm management. They optimally implement these measures to reduce pressure on groundwater quality. For the second group named "Soft Regulation-constraints", Nitrate Directive measures are less suitable for their farm management because they have another lucrative activity than cash crop production. This group could benefit from a redesign of the measures, changing from means- to result-oriented obligation in order to take into account the local conditions and also their farm management constraints. For the third group, denoted as "Strong Regulation-constraints", ND measures are not suitable for their farm management. The way they implement measures is usually not optimal to reduce pressure on groundwater quality. We suggest that, investing in an "action-learning" program for such farmers could make them understand the usefulness of this regulation and help them to make the measure implementation suitable for their farm management. This farm-scale method could be used further for water management stakeholders to (i) evaluate the suitability of measures from Water Policy for the diversity of farm management or (ii) design suitable measures for the diversity of farm management on a territory subjected to groundwater pollution issue.

KEYWORDS: Nitrate Directive; farm scale; suitability; structural impact; strategic consistency

1.2 Introduction

Groundwater is a major source of drinking water in Europe: therefore, its quality is of vital importance (Scheidleder and others, 1999). Water can be degraded through point source or diffuse pollution. Although point source pollution can often be identified and easily addressed, diffuse pollution is more difficult to overcome because it lacks a clearly defined point of entry and is associated with land uses (Macgregor and Warren, 2006). The most notable land use responsible for diffuse pollution is agriculture (Merrington et al., 2002). The shift towards greater intensification of agriculture since the 1960s, including the increased use of fertiliser and greater specialisation of farms and regions, resulted in water quality degradation caused by nitrates and chemical inputs. Nitrates are one of the world's most widespread groundwater pollutants (Lopez et al., 2015).

There is worldwide consensus on eutrophication reduction. To reach this target, the European Union introduced a range of pollution control measures such as the 1991 Nitrate Directive (ND) (91/676/EEC). Under the ND, Nitrate Vulnerable Zones (NVZ) have been defined throughout Europe as either surface or groundwater in which the nitrate levels exceed or are likely to exceed 50mg/L from agricultural sources. The impact of the ND depends upon the interpretation of the requirements by Member States (Andersson et al., 2012; Liefferink et al., 2011), especially the interpretation of 'vulnerable,' because this affects the extent of the territory designated and subject to mandatory requirements.

In France, NVZ were revised in 2015. The revision took place during litigation initiated by the European Commission against France for incorrect application of the ND, notably, for the insufficient surface areas designated as NVZ. Approximately 70%¹⁰ of French farmland is considered vulnerable, mainly in areas where farming activity is highly intensive. In these zones, farmers must implement a set of measures defined in an action programme. This programme includes measures that limit the use of organic and mineral fertilisers (quantity and spatio-temporal limitations), and measures aimed at covering the soil during winter to prevent nitrate leaching and run-off during wet seasons. Despite the water policy, the nitrate pollution of groundwater resources, covering 64% of tap water, remains a major problem in France (Ifen, 2003).

Agronomic research at different scales has facilitated the understanding about why regulatory measures are only partially successful in terms of impact on groundwater quality (Brun, 2003; Oenema et al., 2009). At territorial scale, (Gaigné, 2012) demonstrated that the implementation of livestock regulation measures in France do not decrease the livestock spatial density and, consequently, the nitrate leaching from farmyard manure. At a field scale, (Deneufbourg et al., 2010a) studied in Hesbaye (Belgium), with a lysimeter, the efficiency of two measures from ND (*fertilisation planning* and *soil sampling*) to recover groundwater quality. The study noted that when soil sampling for nitrate content analysis is performed too soon in the winter season, an underestimation of the nitrate soil content may occur, leading to an overestimation of the fertilisation recommendation. Thus, the *soil sampling* measure can negatively impact groundwater quality depending on how the farmers implement it.

¹⁰ Extract of the oral question n° 0954S of M. Jacques Mézard, published in JO Sénat of 04/12/2014, page 2667. Source: <https://www.senat.fr/questions/base/2014/qSEQ14120954S.html> - consulted on 09/12/2015.

At farm scale, several papers demonstrated that numerous European farmers remain unconvinced about the appropriateness of the ND measures to balance farm management and environmental benefits (Barnes et al., 2011, 2009; Buckley, 2012; Macgregor and Warren, 2006; Smith et al., 2007; Widdison et al., 2004). (Chantre et al., 2016) mentioned that regulatory measures are not always agronomically consistent or compatible with farmers' management (Kuhfuss, 2013; Menard et al., 2014), and their positive impact is, thus, not ensured.

The objective of our study is to analyse the diversity in the implementation of the ND's measures on farms and identify the determinants of this diversity at farm scale. This diversity is linked to their level of accordance of ND's measures with farm management and induces different effects on groundwater quality pressure. We assume that if the ND's measures are in accordance with farm management, firstly, these measures would be implemented to effectively reduce pressure on groundwater quality (optimal manner). Secondly, the measures would be implemented long term even if a regulation's contents change (perennial manner). Thus, these results would be discussed to identify the conditions for optimal and perennial implementation of measures within farm management. This study addresses three questions: (1) What is the diversity in the implementation of the ND's measures within farms? (2) Are the approaches to implementing the ND's measures suitable for farm management? (3) What could be the conditions for optimising the implementation of measures to reduce pressure on groundwater quality considering the diversity of farm management?

This work is based on a survey campaign conducted in 2016 on 14 farms in the NVZ in southeastern France (45°54' north, 4°46' east). We developed an analytical framework to assess the suitability of the ND's measures for farm management. Through this in-depth study of the implementation of the measures, we drew recommendations to improve the implementation of water protection measures. Our study aims to complement the literature by providing a farm scale evaluation of water policy with respect to target achievement, effectiveness, and sustainability.

1.3 Material and methods

1.3.1 Case study

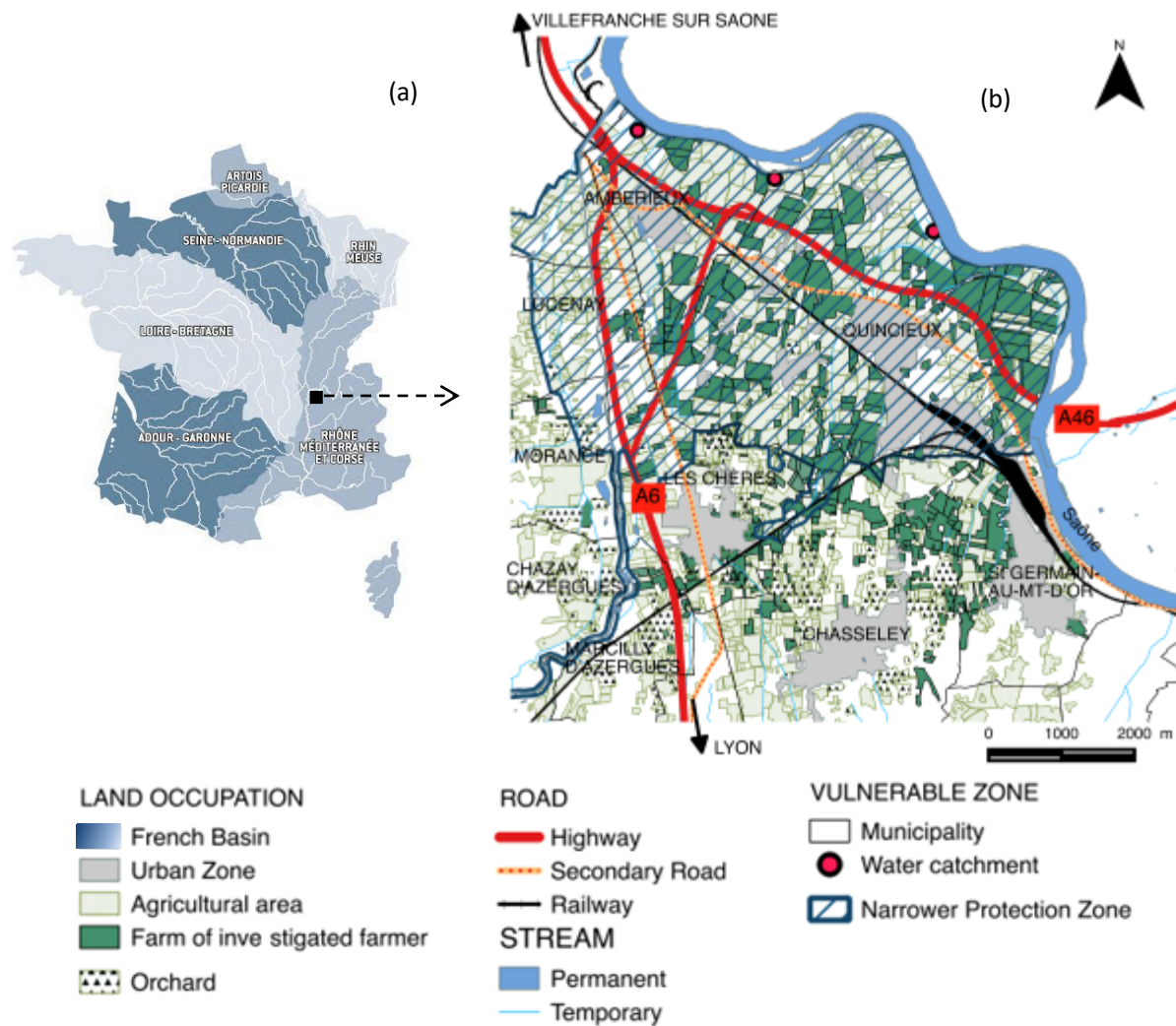


Figure 3. 1: Geographical location of the study area with the NVZ (a) and land occupation of the surveyed farmers in the study area (b) (source: farmers' interview)

This study was conducted in the north of Lyon (45°54' north, 4°46' east) (Figure 3.1.a), in eight municipalities within the NVZ, since 1997 or 2012 (Figure 3.1.b). Cash crops represent most of the land occupation in these municipalities, with corn as the main crop.

This study was based on qualitative semi-structured interviews with farmers. Farms were chosen with the aim of covering a diversity of farm management, including a diversity of crops and livestock production (Table 3.1). We excluded fruit growers because they are not subjected to the ND and represent a small land occupation in the narrower protection zone (Figure 3. 1). Farmers were identified with the help of the technical adviser of the local cooperative. We also used a *snowball* method (farmers providing the contact information for a neighbouring farmer) (Thiéartard, 2004, cited in (Chantre, 2011) to sample farmers without a local cooperative contract and represent the spatial distribution of the farms. We interviewed fourteen farmers located in eight municipalities within the NVZ. These farmers cultivated 59% of the agricultural surfaces in this area (Table 3.1).

Table 3. 1: Main characteristics of the 14 surveyed farms in the NVZ

Farm code	Conservation tillage	Date settlement	of Total (ha)	area	Labour unit per year	Farming system type				
						Main crops	Market gardening (ha)	Orchards (ha)	Livestock Type of farming (LU)	Seed crop (%)
A1	No	1964	71	1.8	Corn; wheat; soybean; rape	0	0	0	0	0
A2	Yes	1978	125	1	Wheat; soy bean; corn; alfalfa	5	0	Suckling cows	14.4	0
A3	No	1999	124	2	Wheat; barley; corn; alfalfa	0	0	Dairy cows	103	0
A4	No	1995	82	1.5	Wheat; barley; corn... change according to seed processor	7	5	0	0	50
A5	No	1987	95	3	Corn; wheat; barley; alfalfa; squash with winter vegetables	14	0	Sheep	18	10
A6	No	1997	69	2	Corn; wheat; sunflower	0	9	0	0	0
A7	No	2004	40	2	Corn; wheat; soybean	0	0	Poultry	72	0
A8	Yes	1986	60	2	Wheat; soybean; sorghum; soybean; fallow land	0	4	0	0	0
A9	Yes	2011	60	1	Corn; wheat; sorghum; soybean	0	0	0	0	0
A10	No	1997	67	1	Corn; wheat; soybean; sunflower; oat	0	0	Suckling cows	9.8	0
A11	No	1993	47	3	Permanent pasture	0	0	Snails	0	0
A12	No	2004	80	1	Corn; wheat; sunflower	0	0	0	0	0
A13	No	1985	56	1	Corn; wheat; soybean	0	0	0	0	0
A14	No	2006	85	2.8	Corn; wheat; rape	0	8	0	0	0

These farmers, located within the NVZ, must implement a set of measures defined by official authorities (Prefectorial Order n°14-88 - 5th Action Program of Rhône-Alpes region) to protect quality water from nitrate contamination (Table 3.2).

These measures are organised into three types according to content and requirements: (a) soil cover measures with *Cover*, *Mulch*, and *Strip*, (b) fertilisation measures with *PlanN*, *SoilN*, and *BalanceN*, and (c) spatio-temporal limitation measures with *Period*, *Stock*, and *Zone*.

Table 3. 2 : Characteristics of the applicable measures in the case study from the ND

ND Measures			
Type	General denomination	Abbreviation	Specific content of measures written in the 5 th Action Program of the ND and applied in this catchment
Soil cover	Cover cropping soil	Cover	Implementing a cover crop during the period between two successive cash crops, when it is long (for ex: between wheat and corn), the sowing of the cover crop being before 1 October.
	Cover cropping soil	Mulch	Crushing and superficially or deeply burying crop residues from sunflower, corn, and sorghum, within 15 days after harvesting, and keeping the <i>Mulch</i> at least two months
	Implementing grass strips	Strip	Implementing and maintaining a permanent plant cover along certain rivers, sections of rivers, and lakes larger than 10 ha being under BCAE (Good Agro-Environmental Conditions).
Fertilisation	Recording fertilisation practices	PlanN	Elaborating fertiliser application plans and recording fertiliser application modalities (date, form, rate)
	Balance fertilisation	SoilN	Measuring soil inorganic N with soil analysis, or calculating nitrogen balance for all farms having at least 3 ha in the NVZ
	Balance fertilisation	BalanceN	Limiting the total applied rate of nitrogen fertiliser by crop type (For example: 50 kg.ha ⁻¹ per hectare limitation for corn from seeding to the 2-leaf stage) Limiting the amount of livestock manure to 170 kg N.ha ⁻¹
Spatio-temporal limitation	Respecting prohibited periods	Period	No spreading of inorganic and organic fertiliser before the 31 January on wheat and rape or before corn
	Having adapted storage for manure	Stock	Having specific storage conditions for livestock manure
	Spreading condition near rivers and catchments	Zone	No organic fertiliser spreading on plots in the narrower protection zone of the catchment

1.3.2 Methodological approach

Aubry and Michel-Dounias (2006) developed a conceptual framework that distinguishes the changes of structure and strategy during the evolution of a farm management. Structure refers to crop management, rotation, materials, and human resources. Strategy refers to a combination of objectives targeted by the farmer where all the decision rules converge (Aubry and Michel-Dounias, 2006). We used this conceptual framework (i) to identify the determinants of the implementation of the ND's measures and (ii) develop an analytical framework that assesses the suitability of the ND's measures for farm management. The assessment of the suitability of the ND's measures consists of evaluating how well these measures, once

implemented, match the farm management. Based on this framework, we successively implemented four steps (Figure 3.2):

1. We analysed how the farmers interpreted the ND's measures, how they implemented them on their farm, and the rationales for these implementations.
2. We assessed the structural impact of the implementation of the ND's measures by referring to structural modifications at the different levels of farm management.
3. We analysed the consistency of structural modifications with the farmer's strategy.
4. We assessed the suitability of the ND's measures for farm management as an integrative analysis of the previous steps.
5. Following the method used by Petit and Aubry (2016), a typology of farms, based on the percentage of 'high' suitability of the ND's measures for their farm management (step 4) and their strategy (step 4), was drawn following the overall analysis.

This allowed the identification of the conditions to optimise the implementation of measures in the diversity of farm management (Figure 3.2).

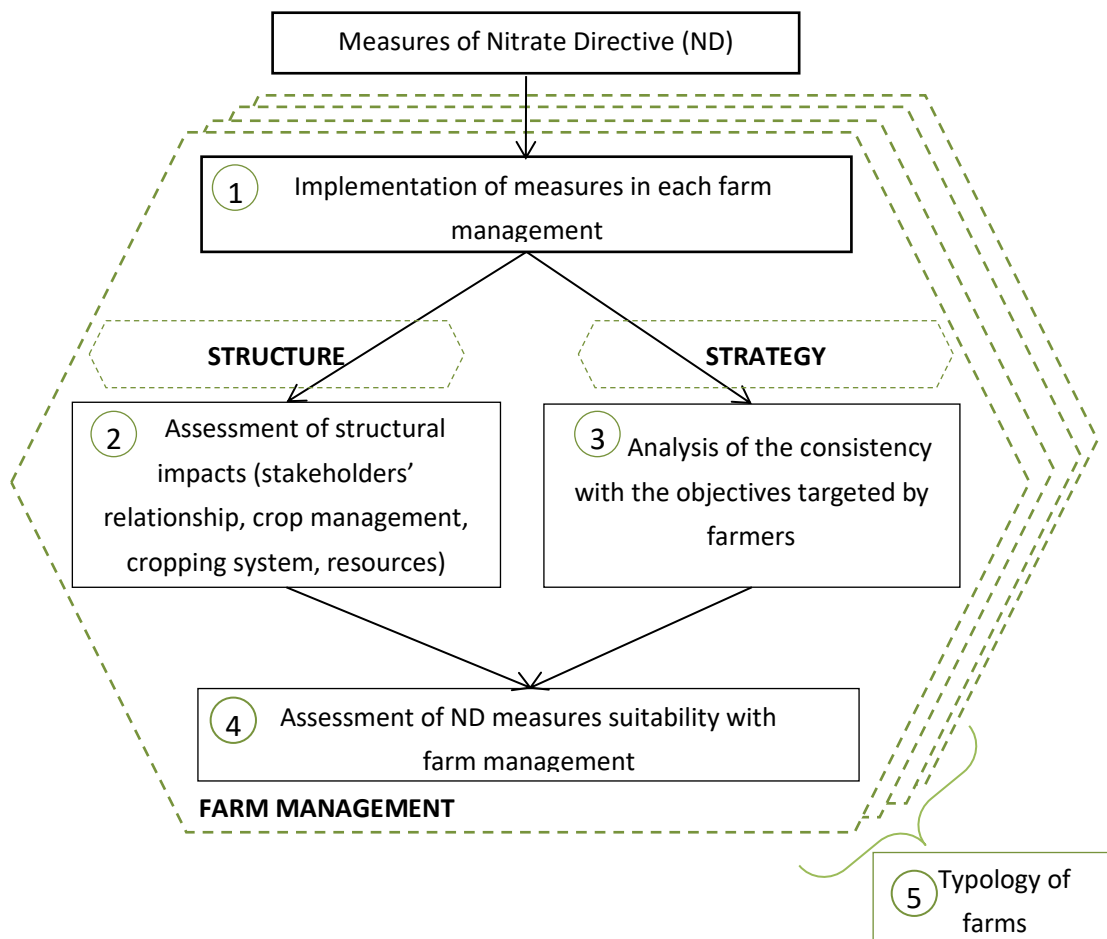


Figure 3. 2: Overall approach of the study: a combination of five steps to assess the suitability of the ND for farm management

Methodology of the survey

We interviewed farmers with a semi-structured questionnaire, so they could express their management logic (Blanchet and Gotman, 2010)¹¹. We combined this approach with fields mapping, because certain measures vary according to the distance between the field and the catchment (Table 3.2: *Zone*) and this method facilitates a dialogue with farmers on their field management (Saqalli et al., 2009). To record structural modification, we listed the farm characteristics before and after the measures' implementation by (i) following an agronomic approach on farm management modelling technical practices with logical rules (Aubry et al., 1998) and (ii) using a timeline to present the history of the production system (Chantre, 2011). These face-to-face interviews were conducted from January to February of 2016 and recorded before transcription. Each interview was summed up by quotes that described each measure: (i) the method of implementation (how and why), (ii) the modification of structure required, and (iii) the strategic consistency.

Methodology of data treatment

The first framework was dedicated to the assessment of the structural impact caused by the measures' implementation (step 2). We classified the structural modification according to the impacted level at farm scale, based on the levels previously identified by (Le Bail et al., 2006). Scale I refers to a change in the relationship with stakeholders or among farmers as the socioeconomic environment plays a role in the measures' implementation (Hellec et al., 2013). Regarding the objective of our study, we considered this first scale as less constraining, because it does not directly effect intrinsic farm management. Scale II refers to a modification of crop management (e.g. fertilisation) and has a slight structural impact. Scale III refers to a change in crop rotation (e.g. introduction of a new crop) and cropping system that involves, by definition, a change in crop management (Sebillotte, 1990). Scale IV refers to a change in capital, human, or machinery resources. Regarding the ND's measures, farm resources may be modified when a modification of the cropping system (scale III) and crop management (scale II) occurs. These three scales are interwoven (cf. box 1). Finally, measures may have no structural impact, either because (i) the farmer is not concerned about the measure (further denoted "-"), (ii) already did what the measure preconised before the announcement of the measure (further denoted "0"), or (iii) did not respect the regulation (further denoted "/").

We assumed that the deeper the structural effect the less suitable the measure's implementation was for the farm management (Table 3.3). We set that structural impact is considerable when it affects at least the rotation or cropping system (scale III) (Table 3). Below this scale, we set that structural impact is slight (Table 3.3).

The second framework was dedicated to the analysis of strategic consistency (step 3). Characterising the diversity of the farmers' individual objectives of farmer is the first stage.

Among the farmers' objectives, "agronomic performance" was common to all the farmers. We weighed this objective as the most important because when a farmer mentions an agronomic benefit related to the implementation of an ND measure, such as soil restructuring or nitrogen input, we assumed that this implementation is suitable for farm management and could be implemented long term, because the

¹¹ See **Annexe 3** : Dispositif d'enquête

agronomic characteristics would not change as promptly as the economic or social characteristics. Thus, to assess the overall strategic consistency of the implementation of the ND's measures, we first evaluated their agronomic benefit and then their consistency with other strategic objectives in the farmer's opinion. The other strategic objectives are economic, social, and environmental achievements.

Box 1 : Methodology illustrations

Example of structural impact (step 2)

To implement the *Cover* measure, farmer A1 bought a new seeder to sow white mustard during rainy periods. Before applying this measure, bare soil has been maintained. After implementing this measure, he must sow white mustard with this new seeder, let it grow, and then destroy it after 1 December. This implies a change in crop management, cropping system, and machinery and labour resources with the buying of the new seeder. This measure implementation thus impacts scale I (purchase of cover crop seeds to local cooperative), II, III, and IV and is thus denoted as scale IV.

Example of strategy consistency (step 3)

For the same farmer A1, we analysed the consistency of this change. The farmer justified the purchase of the seeder because he likes meticulous work. But he also said that the cover crop is useless because, according to his observations, during autumn the white mustard does not release nitrate into the soil for the subsequent crop. Thus, we noted that the *Cover* implementation is consistent with his objective of "technical rigour" (YES) but inconsistent with his strategy of "agronomic performance" (NO).

The final analytical framework results from the combination of structural impact (step 2) and strategic consistency with the implementation of the ND's measures (step 3), making it possible to estimate the suitability of their implementation for farm management (step 4).

Table 3. 3: Final analytical framework of the ND's measures suitability for farm management (step 4)

STRATEGY		OVERALL STRATEGIC CONSISTENCY (AGRONOMIC BENEFIT; STRATEGIC OBJECTIVES CONSISTENCY)		
		STRONG <i>There is at least agronomic benefit</i>	MODEST <i>There is agronomic benefit but strategic objectives inconsistency or any opinion</i>	WEAK <i>There is no agronomic benefit</i>
Not concerned		ANY		
Not applied (no change or no respect)		HIGH	MODERATE	LOW
SLIGHT	Scale I Scale II			
CONSIDERABLE	Scale III Scale IV	MODERATE	LOW	VERY LOW

The studied measure reaches high suitability for farm management when its implementation has a slight structural impact and strong strategic consistency (Table 3.3). The measure is considered to reach a moderate suitability for farm management when its implementation has a (i) slight structural impact and modest strategic consistency or (ii) considerable structural impact but strong strategic consistency. The

measure has low suitability for farm management when its implementation (i) has a slight structural impact and weak strategic consistency or (ii) considerable structural impact and modest strategic consistency. Finally, a measure has a very low suitability if its implementation has a considerable structural impact and weak strategic consistency.

1.4 Results

1.4.1 Step 1: Diversity in the implementation of the ND's measures and their determinants

This first step addresses the diversity in the implementation of the ND's measures, the reasons for this diversity, and instigates a discussion on the impact of these implementations to reduce pressure on groundwater quality.

The measures dealing with soil cover were characterised by highly different methods of implementation among farmers. Concerning *Cover*, there were three ways to implement it. Four farmers (A2; A4; A8; A9) did not change their practices because they were already covering the soil during autumn. Two farmers (A1 and A12) were growing a cover crop because it was compulsory and ploughed it 'as soon as they can' (to mention A1), meaning 1 December. By contrast, seven farmers (A3; A5; A6; A7; A10; A13; A14) were growing a cover crop during winter until February to amend their soil with organic matter and improve its structure (Table 3.4).

Concerning *Mulch*, there were four ways to implement it. This measure was implemented as 'no mulching' by three farmers (A5; A7; A8), who considered it too constraining for their farm management with no environmental benefit. Eight farmers (A2; A3; A4; A6; A10; A12; A13; A14) did 'mulching and ploughing as soon as possible' because it was compulsory, and two of them (A13; A14) maintained the mulch stage until February to favour crop residues' degradation in their loamy soil. By contrast, another farmer (A1) did 'ploughing within 15 days after harvesting' to do meticulous work instead of mulching, which makes the tractor spin after a rain event on their clay soil (Table 3.4).

Concerning *Strip*, implementation is uniform among the farmers having plots near BCAE Rivers (Table 3.1). These farmers settled grass strips of 5 m because it was compulsory.

In conclusion, the effect of soil cover measures' implementation can be optimal to reduce pressure on groundwater quality (e.g. for *Mulch* and *Cover*, leaving the cover crop or the mulch until February is optimal to reduce pressure). The farmers' methods for implementing the soil cover measures are diversified and depend on their farming system (tillage or no tillage), strategy (biodiversity conservation), and agronomic field characteristics (presence of clay or loamy soils) (Table 3.4).

Table 3. 4: Structural impacts on farms, identified from the before/after implementation of the cover soil measures: scales of the related structural modifications and number of involved farmers

Measure	Implementation		Structural impact	Scale	N. of farmer /14
	before	after	Modification – concerned Farmers (code)		
Cover	<i>No long intercropping period</i>		<i>No concern</i> – A11	-	1
	<i>Introducing cover crop for conservation tillage or biodiversity</i>	<i>Introducing cover crop for conservation tillage or biodiversity</i>	No change - A2; A4; A8; A9	0	4
	<i>Leaving bare soil during intercropping period</i>	<i>Introducing rapeseed from farm-saved seeds and ploughing 'as soon as they can'</i>	Providing ground cover until December by establishing rapeseed – A12	III	1
		<i>Introducing white mustard, purchasing grain drill and ploughing 'as soon as they can'</i>	Providing ground cover until December by establishing white mustard and purchasing a new material – A1	IV	1
		<i>Introducing oat-vetch mixed with fodder radish and ploughing after winter</i>	Providing ground cover during winter by establishing cover crop – A5; A14	III	2
		<i>Introducing oat-vetch mixed with fodder radish and other crops and purchasing grain drill</i>	Providing ground cover during winter and purchasing a new material – A3; A6; A7; A10; A13;	IV	5
Mulch	<i>No corn, sunflower, rape cultivation or no long intercropping period after these crops</i>		<i>No concern</i> – A11	-	1
	<i>Letting corn stover on the plot and ploughing when possible or mulching it when the soil structure allows it</i>	<i>Letting corn stover on the plot and ploughing when possible or mulching it when the soil structure allows it</i>	No respect – A5; A7; A8	/	3
	<i>Letting corn stover on the plot and ploughing when possible or</i>	<i>Mulching (crushing and burying corn stover) and ploughing "as soon as they can"</i>	Change of technical crop management – A2; A3; A4; A6; A10; A12	II	6
	<i>mulching it when the soil structure allows it</i>	<i>Mulching (crushing and burying corn stover) and ploughing after winter</i>	Change of technical crop management – A13; A14	II	2
		<i>Ploughing within 15 days after harvest</i>	Change of technical crop management – A1	II	1
	<i>Letting corn stover on the plot and sowing on the stover (conservation agriculture)</i>	<i>Introducing new crop or cover crop avoiding the mulching</i>	Change of crop rotation - A9	III	1
Strip	<i>No rivers under BCAE</i>		<i>No concern</i> – A7; A10; A11	-	3
	<i>Grass strip along the rivers under BCAE</i>		Change of practices along the water courses – A1; A2; A3; A4; A5; A6; A8; A9; A12; A13; A14	II	11

All the farmers who changed their practices to implement the measures on fertilisation management, such as *PlanN*, *SoilN*, and *BalanceN*, followed the recommendation of fertilisation plan and soil sampling; additionally, they mostly subcontracted them to the agricultural adviser from the cooperative (Table 3.5). All the farmers, except A10 and A11, used a decision support system (DSS) for setting the date and rate of the final nitrogen fertiliser application to the wheat. This DSS has been purchased by a dynamic farm machinery cooperative movement located in Quincieux.

In conclusion, the uniform implementation of fertilisation management measures is linked with the territorial context that offers services to local farmers, like subcontracting the realisation of the fertilisation plan or soil analysis to adjust the fertilisation balance on their crops. The farmers' implementations are optimal for reducing the pressure on groundwater quality; however, the question is their degree of suitability for farm management diversity (step 4).

Table 3. 5: Structural impacts on farms, identified from before/after implementation of the fertilisation measures: scales of related structural modifications and number of involved farmers (FP – Fertilisation Plan; DSS – Decision Support System)

Measure	Implementation		Structural impact		N. of farmer /14
	Before	after	Modification – concerned Farmers (code)	Scale	
<i>PlanN</i>	<i>Subcontracting or doing own's FP</i>	<i>Subcontracting or doing own's FP</i>	No change – A6; A7; A9; A12	0	4
	<i>Doing one's FP and following it</i>	<i>Subcontracting FP and following it</i>	Change of relation with stakeholder – A1; A4	I	2
	<i>Doing fertilisation thanks to the past experiment</i>	<i>Subcontracting or doing own's FP and following it</i>	Change of relation with stakeholder and fertiliser quantity – A2; A3; A5; A8; A10; A11; A13; A14	I & II	8
<i>SoilN</i>	<i>Doing soil sample</i>	<i>Doing soil sample</i>	No change – A6; A7; A9; A12	0	4
	<i>No soil sampling</i>	<i>Subcontracting soil sampling to balance fertilisation with FP</i>	Change of relation with stakeholder and fertiliser quantity – A1; A2; A3; A4; A5; A8; A10; A11; A13; A14	I & II	10
<i>BalanceN</i>	<i>Spreading a certain quantity of fertiliser in 2 or 3 applications on wheat</i>	<i>Spreading less fertiliser in 4 applications on wheat according to DSS</i>	Change of fertiliser quantity on crop and its application number – A1; A2; A4; A14	II	4
	<i>Spreading a certain quantity of fertiliser</i>	<i>Spreading less fertiliser using or not DSS on wheat</i>	Change of fertiliser quantity – A5; A6; A7; A8; A9; A10; A11; A12; A13	II	9
	<i>Spreading up to 170 kg/ha/year of manure</i>	<i>Spreading 170 kg/ha/year and complementing with mineral fertiliser</i>	Change of fertiliser nature and its quantity – A3	II	1

The implementations of spatio-temporal limitation measures were highly different among the farmers. Concerning *Period*, three methods of implementation were observed. Ten farmers (A1; A2; A4; A6; A8; A9; A11; A12; A13; A14) did not change, but two farmers (A3; A7) postponed the date of manure spreading (Table 3.1). This temporal limitation created competition for the use of a shared manure spreader (machinery cooperative): when one farmer is using it after the 31 January, the others had to change their manure spreading to a later date. That is why one farmer (A5) substituted spreading before corn by spreading before wheat in the summer to avoid spreading the manure too late for the corn. Regarding *Stock*, there were three ways to implement it. Two farmers (A2; A7) had already the regulatory capacity to store the manure in their stall whereas, one farmer (A3) had to build pit manure. Two farmers (A5; A10) only changed only the place in their field to store the manure (Table 3.6). Regarding *Zone*, only two farmers were concerned because their plots are proximal to the catchment area and one has livestock (A3).

In conclusion, the temporal and spatial limitation measures mostly concern livestock farmers. These measures are constraining for the farmers because they implemented them only because of regulation compliance. Their effect on groundwater pressure can be discussed.

Table 3. 6: Structural impacts in farms, identified from the before/after implementation of the spatio-temporal limitation measures: scales of related structural modifications and number of involved farmers

Measure	Implementation		Structural impact	Scale	N. of farmer /14
	Before	After	Modification – concerned Farmers (code)		
Period	<i>Spreading mineral fertiliser on wheat in February/ March</i>	<i>Spreading mineral fertiliser on wheat in February/March</i>	No change – A1; A2; A4; A6; A8; A9; A11; A12; A13; A14	0	10
	<i>Spreading mineral or organic nitrogen in winter</i>	<i>Spreading after the 31 January</i>	Change of spreading date - A3; A7; A10	II	3
	<i>Spreading mineral or organic nitrogen in winter</i>	<i>Spreading organic fertiliser in summer on another crop</i>	Change of spreading date and crop – A5	III	1
Stock	<i>No livestock</i>		<i>No concern</i> – A1; A4; A6; A8; A9; A11; A12; A13; A14	-	9
	<i>Stall storage</i>	<i>Stall storage</i>	No change – A2; A7	0	2
	<i>Field storage on the same plot</i>	<i>Field storage on different plots and building of a manure pit</i>	Change of material resource – A3	IV	1
	<i>Field storage on the same plot</i>	<i>Field storage on different plots</i>	Change of place to store manure – A5; A10	II	2
Zone	<i>No plots near the catchment</i>		<i>No concern</i> - A1; A2; A4; A5; A6; A7; A8; A9; A10; A11; A12; A14	-	12
	<i>Organic manure on plots near catchment</i>	<i>Mineral fertiliser on plots near catchment</i>	Change of fertiliser – A3	II	1
	<i>Mineral fertiliser on corn crop in plots in Immediate Zone</i>	<i>Abandonment of corn crop and no fertilisation on grassland owned by municipality</i>	Change of fertiliser and crop – A13	III	1

This first step addresses the first question of this article about the diversity of the implementation of the ND's measures within the farmers. For certain measures (*Strip*, *PlanN*, *SoilN*, *Period*, *Zone*), the implementations were uniform. For others (*Cover*, *Mulch*, *BalanceN*, *Stock*), the implementations differed among the farmers, leading to various efficiencies to reduce the pressure on groundwater quality. This diversity is strongly related to (i) farm structure, (ii) farm strategy, and (iii) socioeconomic environment. Thus, we assessed the suitability of the measures' implementation with the diversity of farm management to suggest conditions for optimising their implementation.

1.4.2 Step 2: Farm scale structural impacts of the implementation of the ND's measures

Measures concerning soil cover, such as *Cover*, *Mulch*, and *Strip*, led to changes in farm management for 78%, 68%, and 79% of farmers, respectively, and may have a considerable structural impact ranging from scale II to IV (Table 4). The others were either not concerned or did not change their farm management. Measures dealing with fertilisation management, such as *PlanN*, *SoilN*, and *BalanceN*, implied changes for at least 70% of the farmers (Table 3.5). The remaining 30% are mostly young farmers who had to implement this measure when they settled down, because these measures existed from 1997 onwards (1st Action Program of the ND). Their implementations mostly impacted scale II (Table 3.5). This structural impact is slight because the farmers only changed the fertilisation practices on their crops and their relationship with the local cooperative, when they subcontracted their fertilisation plan. By contrast, the measures with an obligation to respect temporal or spatial limitations, such as *Period*, *Stock*, and *Zone*, neither concerned most of the surveyed farmers nor lead to changes in their farm management (Table 3.6). Only 21%, and 14% changed their farm structure by implementing *Period*, *Stock*, and *Zone*, respectively, and these practices may have considerable structural impact ranging from scale II to IV. Concerning scale IV, only the implementation of two measures reached this scale on structural impact. *Cover* and *Stock* led eight farmers (A3; A4; A6; A7; A10; A12; A13; A14) to change their machinery resources (Table 3.4). Unlike the manure pit building from the *Stock* implementation that was compulsory, the purchasing of a new seeder to implement *Cover* was based on the farmer's initiative. Likewise, farmers A2, A9, A13, and A5 changed their rotation and cropping systems, impacting scale III, to circumvent *Mulch*, *Period*, or *Stock* implementations. In conclusion, the scales of structural impact vary according to the type of measures that have different technical specifications. However, the interpretation of the ND's measures by farmers can play a key role in the related structural impact scales.

1.4.3 Step 3: Consistency of the implementation of the ND's measures with the farmers' strategy

By clarifying the objectives that led the farmers managing their farm, we observed that all the farmers except A11 aimed at high agronomic performance, specifically, good soil structure (Table 3.7). Certain farmers implemented protein crops (A1) or performed direct seeding (A2, A8, A9) to improve their soil structure. Others focused on nitrogen input management, avoiding nitrogen loss for economic or environmental matters (A3, A4, A5, A6, A10, A12, A14).

In addition to the objective of agronomic performance, we identified six types of strategic objectives, each related to economic, technical, environmental, or social performances: cost reduction (type A), gross margin increase (type B), technical rigour (type C), environment preservation (type D), and reduction or improved spreading of the workload over the year (type E) (Table 3.7). Reducing the costs (type A) and increasing gross margin (type B) are both economic objectives, but explain different implementations of the same measure among farmers. For instance, concerning *Cover*, the variety and origin of cover crop seeds are diverse. Reducing costs (A) explains that farmers used farm-saved seeds for cover crops. Gross margin increasing (B) entails the sowing of a mix that can add nitrate to the soil and reduce the cost of mineral fertiliser on the subsequent crop. The overall strategy of each farmer is defined by a combination of objectives from these seven strategic objectives. Each objective was related to the descriptors of farm management (Table 3.7).

Table 3. 7: Seven types of objectives set by the farmers in the studied catchment area. Each type is described by the most typical practices or a verbatim account from the interviewed farmers

STRATEGY		
Type of performance	Related Objectives	Typical practices and verbatim from interview
AGRONOMIC PERFORMANCE		<ul style="list-style-type: none"> - Cultivating protein crop for restructuring soil – A1 - Purchasing machinery that are more efficient for soil restructuring, organic matter mineralisation – A2; A7; A14; A13 - Direct seeding with green manure covering soil and bringing nitrogen – A2; A8; A9 - Being more precise with the balance of fertilisation – A3; A6; A12 - Implementing cash crop or green manure to put nitrogen to the system – A4; A5; A10; A14
	A. Costs reduction	<ul style="list-style-type: none"> - Direct seeding to reduce cost of tillage – A10 - 'Improving my income is my priority' – A3 - Substitution of pesticides or fertilisation inputs with less expensive ones – A5; A12 - Setting aside 20% of the arable area of the farm – A8 - Seeding farm-saved seeds for green manure – A12
ECONOMIC	B. Gross margin increase	<ul style="list-style-type: none"> - Direct selling – A4; A6; A7; A8; A10; A11; A14 - Increasing livestock activity to be more profitable – A5 - Cultivating seed crop or another high value crop – A13 - Being self-sufficient for the food supply for animals – A7 - Cultivating catch crop – A9
	C. Technical rigour	<ul style="list-style-type: none"> - 'Doing very good and clean work and do it at the right time' – A1 - 'I like when it is clean' – A4 - Purchasing guide bar on spreader to be more precise - A13
ENVIRONMENTAL	D. Environment conservation	<ul style="list-style-type: none"> - Implementing cover crop to decrease chemical input – A2 - Setting experiments with technical institute to study chemical inputs and their agronomic implication on plots – A4 - Decreasing chemical inputs considered as 'poison' A5; A6; A14 - Using adjuvant to decrease chemical input dose – A9
SOCIAL	E. Reduction or better spreading of workload over the year	<ul style="list-style-type: none"> - Seeding late variety of wheat or spreading sowing date over time– A5, A3 - Avoiding mulching – A5, A12 - Reduced tillage to decrease work – A10 - Subcontracting crop operations (like sowing) or farming activities – A1, A10, A13

After identifying the overall strategy of each farmer, we assessed (i) the agronomic consistency and (ii) the economic, social, and environmental consistency of each implemented measure with regard to the farmer's opinion (Table 3.8).

For the soil cover measures, seven farmers (A3; A5; A6; A7; A10; A13; A14) who grew a groundcover during winter until February, and the two farmers (A12, A13) who let the mulch lay during winter on their loamy soil, mentioned agronomic benefit. They observed soil restructuration and a supply of nitrate from these techniques. *Strip* implementation also demonstrated an agronomic benefit for every concerned farmer, because trees are located near the rivers on unproductive zones for cash crops. However, two farmers (A1, A12) ploughed their cover crop 'as soon as they can', that is, 1 December (Table 3.6) by *Cover* implementation. They did not observe nitrate input in their plots, and the implementation of this measure appears inconsistent with their agronomic performance objective. For seven farmers (A2; A3; A4; A6; A10; A12), *Mulch* implementation has no agronomic benefit. They have fields with clay soil, where mulching after rainfall events creates mud, postponing tillage operations. This measure's implementation is constraining for farmers who have clay soil and is mostly inconsistent with their strategy. They mentioned only regulation constraints about the implementation of *Cover* and *Mulch* and do not see their relevance for reducing pollution and improving groundwater quality.

Among the measures on fertilisation management, *PlanN*, and *SoilN* show agronomic consistency for nine farmers (A1, A2, A4, A5, A6, A7, A9, A11, A12, A14) because they led to (i) a improved balance of fertiliser on their crops and (ii) an accurate monitoring of the nitrogen supply. Out of these nine farmers, three (A1, A6, A9) refrained from additional potassium-based fertiliser applications. However, the farmers chose to subcontract the fertilisation plan and soil sampling, which is expensive and, thus, inconsistent with the objective of reducing costs (type A) for four farmers (A3, A5, A10, A13). Regarding *balanceN*'s implementation, certain farmers (A4; A8; A10; A11; A13; A14) reduced the amount of applied fertiliser, which is in line with their objective of reducing costs (type A). However, four farmers (A1; A2; A5; A14) mentioned consequences for crop yield reduction, which is inconsistent with their objective of a gross margin increase (Type B).

The ND's *Zone*, *Stock*, and *Period* measures entail spatio-temporal constraints. When their implementation induced considerable structural impact (scale III or IV), such as pit building for A3 or change of crop rotation for A5 and A13 (Table 3.6), it was inconsistent with their objectives to improve the spread of their work load over the year (type E) and reduce costs (type A). The *Period* measure mostly led to no change for the interviewed farmers, and was neither consistent nor inconsistent with the farmers' strategic objectives.

Table 3. 8: Overall strategic consistency ('YES' green) and inconsistency ('NO' red) of the implementation of the ND's measures for each farmer (na: not applicable; grey: not concerned) - Combination of agronomic consistency (dark colour) and strategic objectives consistency as economic, social, and environmental (light colour)

	Cover ^a	Mulch ^a	Strip ^a	PlanN ^b	SoilN ^b	BalanceN ^b	Period ^c	Stock ^c	Zone ^c
A1	NO	NO	na	YES	YES	NO	na		
	NO	NO	na	na	NO	NO	na		
A2	YES	NO	YES	YES	YES	NO	na	YES	
	YES	NO	na	na	na	na	na	na	
A3	na	NO	NO	NO	na	NO	na	na	NO
	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
A4	YES	NO	YES	YES	YES	YES	YES		
	YES	NO	na	YES	na	na	na		
A5	NO	NO	NO	YES	na	NO	NO	na	
	NO	NO	na	NO	NO	NO	NO	na	
A6	NO	NO	NO	YES	YES	na	YES		
	NO	na	na	YES	na	YES	na		
A7	YES	NO		YES	YES	YES	na	na	na
	YES	na		na	na	na	na	YES	NO
A8	YES	YES	YES	na	na	na	na		
	YES	na	na	NO	NO	YES	na		
A9	YES	YES	na	YES	YES	YES	YES		
	YES	na	na	na	YES	na	na		
A10	YES	NO		na	na	YES	na	na	
	NO	NO		NO	NO	na	na	YES	
A11				YES	NO	na	na		
				na	NO	na	na		
A12	NO	na	YES	YES	YES	na	na		
	NO	NO	na	na	NO	YES	na		
A13	NO	YES	na	na	na	NO	na		NO
	NO	NO	NO	na	NO	na	na		NO
A14	YES	YES	YES	YES	YES	NO	YES		
	na	NO	na	YES	na	NO	na		

Finally, concerning environment preservation strategy (Type D), the specific aim of each measure and its potential efficiency such as reducing nitrogen lixiviation is not clearly presented, and the farmers rarely mentioned environmental consistency.

1.4.4 Step 4: ND's measures suitability for farm management

Measures concerning soil cover mostly demonstrated either high or low to very low suitability for farm management, especially for *Cover* and *Mulch* (Table 3.9). This result is because of the diversity of their implementation (Table 4) and the farmers' strategies (Table 3.7). The measures dealing with fertilisation management (*PlanN*, *SoilN*, *BalanceN*) mainly showed high suitability because the structural impacts of their implementations were slight. Nine farmers experienced agronomic benefits from these measures. Five farmers (A1; A2; A3; A5; A14) reported low suitability for their farm management regarding their *BalanceN* implementation because yield decreased (Table 3.7). Concerning spatio-temporal limitation measures, *Zone* demonstrated a low to very low suitability for the three concerned farmers (A3; A7; A13) (Table 3.7). This measure led to considerable structural modifications, especially for the farmers with livestock. The *Period* measure demonstrated high suitability because it did not entail any change for most of the farmers (Table 3.4).

Table 3. 9: Suitability of each ND measure for farm management for the 14 surveyed farmers (Mod.: moderate, NC: Not concerned)

Farm	Cover	Mulch	Strip	PlanN	SoilN	BalanceN	Period	Stock	Zone	Number of 'High' + 'NC' (%)	Type
A4	High	Low	High	High	High	High	High	NC	NC	8 (89%)	I
A9	High	Mod.	Mod.	High	High	High	High	NC	NC	7 (78%)	
A2	High	Low	High	High	High	Low	Mod.	High	NC	6 (67%)	
A11	NC	NC	NC	High	Low	Mod.	Mod.	NC	NC	6 (67%)	
A14	Mod.	Mod.	High	High	High	Low	High	NC	NC	6 (67%)	
A6	Very Low	Low	Low	High	High	Mod.	High	NC	NC	5 (55%)	II
A7	Mod.	Low	NC	High	High	High	Mod.	High	Low	5 (55%)	
A8	High	Low	High	Low	Low	Mod.	Mod.	NC	NC	4 (45%)	
A10	Low	Low	NC	Low	Low	High	Mod.	High	NC	4 (45%)	
A12	Very low	Low	High	High	Mod.	Mod.	Mod.	NC	NC	4 (45%)	III
A1	Very low	Low	Mod.	High	Mod.	Low	Mod.	NC	NC	3 (33%)	
A13	Very low	Mod.	Low	Mod.	Low	Low	Low	NC	Very low	1 (11%)	
A5	Very low	Low	Low	Mod.	Low	Low	Low	Mod.	NC	1 (11%)	
A3	Very low	Low	Low	Low	Low	Low	Low	Very Low	Very Low	0	

The fourth step, including steps 2 and 3, addresses the second question of this article, which is about the suitability of the ND's measures for farm management diversity. In conclusion, the suitability of the ND's measures for farm management was diverse according to (i) the type of measure, (ii) farm management, and (iii) socioeconomic environment. The second point spurs a typology of farm management regarding the suitability of the ND's measures.

1.4.5 Step 5: Typology of farm management

We created a typology of the fourteen farms according to the proportion of 'High and NC' and the farmer's strategy (Table 3.7):

- The first type is a group of farmers with greater than 55% of the ND's measures suitable for their farming system and they have an environment conservation strategy.
- The second type comprises farmers with approximately 50% (between 55% and 45%) of the ND's measures suitable for their farming system. Their main objective is to reduce their workload over the year, and they are sensitive to groundwater protection.
- The third type represents farmers with less than 45% of the ND's measures suitable for their farming system. Their main objective is to reduce costs, but they are not sensitive to groundwater quality.

Type I: High suitability of the ND's measures with farm management: The 'Beyond Regulation'

Five farmers belong to this type (A2; A4; A9; A11; A14). The groundwater quality measures are mostly in the high suitability category for their farm management. The implementation of the ND's measures is uniform among these farmers and usually entails no change or a slight structural modification: this is consistent with their strategy. Among these five farmers, four (A2; A4; A9; A14) aimed at 'environmental conservation' (type D) (Table 3.7) and transcended the regulation to protect or recover groundwater

quality. Moreover, the last farmer (A11) had no cash crop activity (Table 3.1) and was, thus, unconcerned about most of the ND's measures.

Type II: Moderate suitability of the ND's measures with farm management: The 'Soft Regulation-Constraints'

Four farmers belong to this type (A6; A7; A8; A10). The ND's measures exhibit mostly moderate suitability for their farm management. Unlike the farmers in type I, the implementation of the ND's measures are slightly inconsistent with their strategy. These four farmers had arable activities but received most of their income from another lucrative farming activity, respectively, orchards, poultry farming, fruit juice processing, and selling and raising livestock. There is diversity in the implementation of the ND's measures in their working schedule and agronomic conditions, explaining that according to the weather, season, and year, they did not always implement them. Concerning fertilisation measures, this other lucrative activity provided room for "well-implementing" them.

Type III: Low and very low suitability of measures: The "Strong Regulation-constraints"

Five farmers belong to this type (A1; A3; A5; A12; A13). The ND's measures are mostly characterised as having low or very low suitability for their farm management. The implementation of the ND's measures is mostly close to the regulations' content (i.e. growing mustard seed, written in the regulation, and ploughing as soon as allowed), induces mostly a high structural impact, and is inconsistent with their strategy. Two farmers (A3; A5) report valuable livestock activity, one (A12) has an orchard, and two (A1; A13) are retired farmers (but still working on their farms) with the main common objective of *technical rigour* (type C) (Table 3.7). Farmers in type III are either retired farmers, thus unwilling to change their practices, or farmers with a time-consuming high-priority activity, being mostly temporally constrained by the implementation of the ND's measures.

In conclusion, the analysis reveals that the diversity of measure implementations and their suitability for farm management depend on (i) the strategy of the farmer, and (ii) the characteristics of an alternative activity to cash crop productions (lucrative; time-consuming).

1.5 Discussion and conclusion

Linked to the first question, how farmers implemented the ND's measures, and the second, the suitability of these measures for farm management, is a third question about the conditions for optimising the implementation of the ND's measures to reduce pressure on groundwater quality considering the diversity of farm management.

1.5.1 Conditions within farm management for optimising the implementation of the ND's measures to reduce pressure on groundwater quality

Our results indicate that measures from the ND are questionable regarding their suitability for farm management diversity and efficiency to reduce the pressure on groundwater quality. The three identified types of farms are in line with the types of farms identified in a farm scale study in the Republic of Ireland

(Buckley, 2012). This study analysed the implementation of the European Union's ND after the first 4 years of the National Action Program phase.

Concerning the farmers in type I, 'Beyond Regulation', the regulations mostly do not influence their farm operations, and they credit certain regulations with environmental benefits in terms of water quality ((Buckley, 2012). Due to our farm scale approach, we observed that the way the farmers' implemented the ND's measures involved practices assumed to reduce groundwater quality pressure.

The farmers in type II, 'Soft Regulation-constraints', feel positive about regulation implementation and the associated environmental benefits but tend to argue that the regulations are too inflexible, do not consider the local conditions, and discount their expertise about how to manage their land (Buckley, 2012). Some farmers in type II implement measures only in case of favourable pedoclimatic conditions (e.g. a farmer who does not mulch because it is impossible to bury the residues in hard clay soil when autumn is dry). One of the drawbacks of a strict 'one size fits all' regulation is that it does relate its standards to the prevailing soil and hydrological conditions. Moreover, this regulation is written with mean obligation and does not let flexibility to farmers rather than result obligations. Finally, for this type of farmer, redesigning measures from a means to a result obligation that considers the local conditions and the farmers' local expertise would be required.

For the farmers in type III, 'Strong Regulation-constraints', the regulations have a significant effect on how they manage their farm (Buckley, 2012). They are unconvinced that the regulations are helping to improve water quality even when proven to be efficient at reducing the pressure on water quality. However, we observed that the implementations of the ND's measures are not suitable for their farm management. The measures do not have an optimal implementation, endangering their ability to reduce the pressure on groundwater quality (e.g. *Cover* implementation, where a farmer sows a cover crop during drought without the obligation to irrigate and, consequently, leaves the soil bare during autumn). This situation could be because of the gaps in the farmers' knowledge about the ND's regulations, as demonstrated in a study of the a catchment in the United Kingdom (Widdison et al., 2004). Farmers claim a lack of physical evidence because the complexity of N lixiviation led to reluctance in positively participation within regulatory schemes (Macgregor and Warren, 2006). Finally, for this type of farmer, it would be necessary to have more concise and clearer information on the regulation's guidelines ((Widdison et al., 2004) that explain the purpose of the ND's measures. Also essential is to set an 'action-learning' approach to ensure the farmers' understand the usefulness of this regulation and that the measure's implementation is suitable for their farm management.

To conclude, regulation incentives play a critical role in improving water quality, but the long-term, chronic forms of diffuse pollution associated with agriculture will only be reduced significantly with the active cooperation of farmers (Macgregor and Warren, 2006). Because of our farm scale approach, we may be able to propose different recommendations to create optimal ND-measure implementation to reduce the pressure on groundwater quality. For farmers with 'environmental protection' objectives or those not concerned about regulations (Type I), we have no further recommendation. For farmers with another lucrative farming activity other than arable activity (type II), the ND's measures should be designed with a result obligation. Finally, for farmers with a prior objective of 'reduction costs' and a time-

consuming activity other than arable activity, or who are retired (type III), the ND's measures should be combined with guidelines or an 'action-learning' programme.

1.5.2 Usefulness of the farm scale method

To understand that water policy measures are only partially effective at preserving groundwater quality (Brun, 2003; Oenema et al., 2009), studies across developed countries have investigated farmers' attitude towards compulsory water quality management regulations. The predominant themes that emerged from these studies include the acceptance of water pollution problems associated with agriculture (Barnes et al., 2011; Buckley, 2012; Macgregor and Warren, 2006; Morton, 2007); knowledge gaps around regulations (Smith et al., 2007; Widdison et al., 2004), resistance to compulsory regulations, and burden of compliance in terms of time and costs (McDermaid, 2005). Our method allows us to overcome all these themes by factually studying how farmers implemented the measures in the ND and their rationales, and can also be expanded to measures from water management concerning limitation of chemical inputs.

In this paper, this farm scale method was applied to compulsory measures. Concerning voluntary measures, this method could be useful to explain the low rate of adoption of voluntary measures because of their unsuitability for farm management diversity. Conducting a study by following our farm scale method might explain (i) a low adoption of these measures by farmers cultivating on a territory subjected to groundwater pollution issues (Kuhfuss, 2013; Menard et al., 2014), and (ii) when adopted, their withdrawal when the contract's period terminates, as often observed in the case of agri-environmental measures (Kuhfuss, 2013), an issue that has been referred to as the 'end of the contract problem' (Whitby, 2000) cited in (Kuhfuss et al., 2015).

Through this farm scale method, we can assess (step 1) how the farmers implemented measures on water quality management regulation, (step 2) their impact on farm structure, (step 3) their consistency with the farmers' strategy, and (step 4) their suitability for farm management. These four steps are relatively simple to follow and could be used by water management stakeholders to

- Identify favourable conditions (from farm characteristics to the socioeconomic environment) to implement water policy measures in an efficient and perennial manner to reduce the pressure on groundwater quality.
- Retrospectively evaluate the suitability of water policy measures with the diversity of farm management.
- Design efficient and perennial measures that protect and reduce the pressure on groundwater quality and are suitable for the types of farm management. A global approach at farm scale seems essential to design measures suitable for the diversity of farm management in territories where groundwater quality is an issue.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to thank the French Rhone - Mediterranean and Corsica Water Agency for funding the research project underlying this paper. We thank Dr. Sylvie Degermann for her help with English corrections. Special thanks are due to the 14 farmers, cultivating in the narrower protection zone of Water Catchment 'Plaine des Chères', for their collaboration and friendliness.

Les cinq étapes que propose cette méthodologie ont permis d'analyser **la diversité de mise en œuvre des mesures de la DN** par les 14 agriculteurs de la Plaine de Chères et de les regrouper par types d'exploitation en fonction de **l'adéquation des mesures avec le fonctionnement de leur exploitation**. Les 14 exploitations agricoles étudiées présentent une diversité de systèmes agricole (5 en polyculture-élevages, 3 en agriculture de conservation, 3 avec un atelier d'arboriculture et 3 de maraîchage...). Ainsi, le cadre d'analyse d'une exploitation, composée de **sa structure** et de **sa stratégie**, a permis de s'adapter à la diversité des systèmes agricoles rencontrés et d'identifier des déterminants à la mise en œuvre des mesures de la DN. Ces déterminants, liés au fonctionnement de l'exploitation, permettent d'orienter l'application optimale des mesures, pour réduire la pression polluante sur les eaux souterraines.

Afin de consolider ces résultats et de vérifier la pertinence de la méthodologie développée, une étude similaire a été menée en Val de Durance, sur l'AAC « Hippodrome ». Par ailleurs, ce cas d'étude présente un autre type de mesures que celles de la DN. Il s'agit des mesures d'une charte issue d'un processus réglementaire et signée par les agriculteurs pour garantir son application. Nous analyserons donc l'intérêt des mesures de la charte par rapport aux mesures coercitives de la DN.

2. ÉTUDE DE L'ADEQUATION DES MESURES DE LA POLITIQUE DE L'EAU AVEC LE FONCTIONNEMENT DES EXPLOITATIONS AGRICOLES DE L'AAC D'ORAISON

2.1 Caractéristiques des exploitations agricoles et du cadre réglementaire

Cette étude a été menée en région PACA sur l'AAC d'Oraison qui est une commune désignée **ZVN**. Le captage est « **prioritaire** » au titre de la politique Grenelle en 2009 et puis en 2010 au titre du SDAGE. Il présente un problème d'Atrazine et de Nitrates qui semble se résoudre avec une baisse des concentrations dans la nappe. Il faut néanmoins porter une attention particulière aux molécules fortement utilisés que sont le Glyphosate et le Diquat. Un processus participatif et réglementaire s'est mis en place sur ce territoire et **une charte** a été proposée en 2011 qui définit des actions sur lesquelles se sont **engagés individuellement les exploitants agricoles de l'AAC**.

Les mesures que doivent appliquer les agriculteurs du deuxième cas d'étude sont **celles de la DN et les mesures de la charte** qui sont plus ou moins semblables à celles de la DN. Les mesures « pilotage de la fertilisation azotée sur blé dur et maïs » et « mesure de reliquats azotés du sol » sont identiques tandis que « diversification de l'assolement », « gestion raisonnées des intrants » et « formations à différentes techniques agricoles » se différencient du fait qu'elles répondent à un enjeu de réduction de l'utilisation des pesticides. L'adéquation de ces trois mesures avec le fonctionnement des huit exploitations agricoles sera étudiée.

Sur ce cas d'étude, cinq exploitants agricoles sur les huit sont spécialisés en grandes cultures irrigués avec comme cultures principales le maïs, le blé et le soja et pour certains des cultures de betterave ou colza semence (cf. Tableau 3.1). Leur surface agricole est en moyenne de 60ha avec pour certains, la majorité de leur surface sur l'AAC (cf. Figure 2.4 : O5, O1). Trois agriculteurs (O2, O4, O5) sont en agriculture de conservation. Les agriculteurs O7 et O8 sont de jeunes agriculteurs qui ont respectivement une activité

équestre et d'élevage bovin en agriculture biologique sur Forcalquier (cf. Tableau 3.1). L'agriculteur O8 a une exploitation divisée en deux, avec un système conventionnel sur Oraison et en agriculture biologique sur Forcalquier, sur les parcelles non irrigables.

Tableau 3. 1 : Principales caractéristiques des 8 exploitants agricoles (EA) enquêtés (Arbo – arboriculture & M – maïs, B – Blé, C – Colza, Cs – Colza semence, T – Tournesol, S – Soja, S* – Soja dérobé, So – Sorgho ; O – Orge, SF – Sainfoin ; P – Pois ; Luz – luzerne

EA	Système ¹²	Date	SAU (ha)	UTH	Système agricole			Productions de semences (%SAU)
					Principales cultures	Maraichage (ha)	Élevage	
O1	I	1980	50	1	M/M/S et T/B/B			
O2	II	1989	65	1	B/S* ou Cs ou O/SF/P			10
O3	I	1995	76	2	M/O/T ou M/M/M & M/S/TouM	5		5
O4	II	2005	60	1	M/P/C/SF ou S/couvert/M & M/M/M/B/S ou M/M..			
O5	II	1986	40	1	B/S*/couvert (leg)/C/couvert (leg+gram)/S & B/SF & C en association avec gesse			
O6	I	1989	94	2.5	B/M/S/T			
O7	I	2011	30	2	Luz/B/O/S*		20 chevaux	
O8	I	2001	400	4	B/C et amandier (Oraison) & olivier bio, épeautre bio et B/C (Montfort)		20 vaches allaitantes	

2.2 Résultats en Val de Durance

2.2.1 Étape 1 : Diversité d'insertion des mesures

Les résultats sont organisés suivant les trois groupes de mesures, identiques à ceux de l'article (cf. § 1.3.1), qui sont : (i) l'obligation de couverture du sol (*Mulch, Couvert et Bande*) (ii) la gestion de la fertilisation azotée (*PlanN, SolN et FertiN*) (iii) les contraintes spatio-temporelles (*période, stock, zone*). Sur ce terrain s'ajoute un quatrième groupe de mesures, celui de la charte (*Div, Intrans, Formation*). Les tableaux ci-dessous présentent la manière dont les agriculteurs de l'AAC Hippodrome ont inséré les mesures et le niveau d'impact structurel lié à ce changement (cf. § 1.3.2).

Pour les mesures à obligation de couverture du sol, la moitié des agriculteurs ne sont pas concernés par les mesures *mulch* dû à l'absence de culture de maïs, tournesol ou sorgho dans leur rotation. Malgré un accès à l'irrigation grâce au canal EDF, certains ont arrêté la culture de maïs, lié à des sécheresses de plus en plus longues durant l'été. De même, ils ne sont pas concernés par la mesure *bande* car sans cours d'eau au bord de leurs parcelles. Pour la mesure *Couvert*, les trois agriculteurs pour lesquels son insertion n'implique pas de changement sont ceux qui pratiquent déjà l'agriculture de conservation (cf. Tableau 3.2). Pour ceux qui ont dû mettre en place un couvert, un agriculteur achète un mélange de semence destiné au couvert, et les quatre autres sèment des semences de ferme disponible chez eux, dans un but

¹² I est un système conventionnel et II un système en agriculture de conservation

de diminuer les charges (cf. Tableau 3.2). Du fait d'une sécheresse en été sur ce territoire méditerranéen, la mesure *Couvert* devrait s'accompagner d'une irrigation afin d'arriver au résultat attendu : couvrir le sol en automne/hiver afin d'augmenter la capacité de rétention du sol et donc limiter la lixiviation de l'azote minéralisé. Néanmoins, l'irrigation a un coût qui limite cette pratique non obligatoire. Les quatre agriculteurs qui sèment des fonds de sac ou laissent les repousses sans irrigation (cf. Tableau 3.2), présentent une application de *Couvert* qui ne permet pas de protéger la qualité des eaux souterraines de façon optimale.

Tableau 3. 2: Diversité d'insertion des mesures de couverture du sol et leur Impact Structurel (IS)

Mesure	Application		Changement	Nb	
	Avant	Après		EA /8	IS
Couvert	<i>Pas de rotation avec interculture longue</i>		<i>Non concerné – O8</i>	1	-
	<i>Implantation d'un couvert</i>	<i>Implantation d'un couvert</i>	Pas de changement – O2, O4, O5	3	-
	<i>Pas d'interculture</i>	<i>Implantation d'un couvert avec un mélange de semences acheté</i>	Changement de rotation – O8	1	III
		<i>Laisser les repousses ou implantation d'un couvert avec les semences de fond de sac</i>	Changement de rotation- O1, O3, O6	3	III
Mulch	<i>Pas de maïs, sorgho ou tournesol</i>		<i>Non concerné – O2, O5, O7, O8</i>	4	-
	<i>Laisser les cannes de maïs après récolte</i>	<i>Mulcher les cannes de maïs</i>	Changement de pratiques- O1, O3, O4, O6	2	II
Bande	<i>Pas de parcelles proches de cours d'eau</i>		<i>Non concerné – O2, O3, O4, O5, O6, O7, O8</i>	7	-
	<i>Épandage au bord du cours d'eau</i>	<i>Épandage à 2mètres du bord de cours d'eau</i>	Changement de pratiques – O1	1	II

Pour les mesures de gestion de la fertilisation azotée, on note que six agriculteurs font leur plan de fumure et un reliquat azoté sans tenir compte des résultats/préconisations (cf. Tableau 3.3). Cela comprend plus de la moitié des agriculteurs de l'AAC. Malgré un renforcement de ces mesures avec celle de la charte qui sont identiques, cela n'a pas permis d'entraîner un suivi optimal de ces mesures. Ces agriculteurs ne sont pas convaincus de la pertinence du bilan azoté proposé par la DN et des mesures du reliquat que certains agriculteurs trouvent trop précoces. On observe donc un scepticisme sur les outils à mettre en œuvre pour une meilleure gestion de la fertilisation. Néanmoins, ces huit agriculteurs ont diminué la quantité de fertilisant azoté sur blé et maïs (cf. Tableau 3.3).

Tableau 3. 3: Diversité d'insertion de la gestion de la fertilisation azoté et leur Impact Structurel (IS)

Mesure	Application		Changement	Nb	
	Avant	Après		EA /8	IS
PlanN	<i>Fait son plan de fumure</i>	<i>Fait son plan de fumure</i>	Pas de changement – O8	1	-
	<i>Pas de plan de fumure</i>	<i>Sous-traite son plan de fumure et suit les préconisations</i>	Changement des relations socio-économique et de la balance azoté sur culture – O7	1	II
	<i>Pas de plan de fumure</i>	<i>Fait son plan de fumure sur excel (développé par un agriculteur de l'AAC) et ne suit pas les préconisations</i>	Changement des relations inter-exploitations – O1, O2, O3, O4, O5, O6	6	I
SoIN	<i>Fait des analyses de sol</i>	<i>Fait des analyses de sol</i>	Pas de changement – O5, O8	2	-

	<i>Pas d'analyse de sol ou reliquat azoté</i>	<i>Fait des reliquats azotés qui permettent d'équilibrer la fertilisation</i>	Changement des relations socio-économique et de la balance azoté sur culture (pratique) – O7, O2	2	II
		<i>Fait des reliquats azotés dont ils n'utilisent pas les résultats</i>	Changement des relations socio-économiques – O1, O3, O4, O6	4	I
FertiN	<i>Pas de changement de ses pratiques de fertilisation azotés</i>		Pas de changement – O7, O8	2	-
		<i>Diminution de la fertilisation et fractionnement</i>	Changement de la fertilisation – O2, O5	2	II
		<i>Diminution de la fertilisation</i>	Changement de la fertilisation – O1, O3, O4, O6	4	II

Concernant les mesures liées aux contraintes spatio-temporelles, ils ne sont pas concernés pour la mesure *Zone*, car il n'y a pas de zone rapprochée sur l'AAC « Hippodrome », d'une surface de 296ha. Un seul agriculteur (O7) est concerné par la mesure *Stock* du fait d'une activité équine, seul sur cette AAC (cf. Tableau 3.4). Cette mesure a incité la vente de fumier (en surplus) aux agriculteurs ayant un atelier grandes cultures. Pour la mesure *Période* qui contraint les agriculteurs à épandre l'engrais azoté sur blé/orge après le 15 janvier, on observe différentes manières de la mettre en œuvre. Pour deux agriculteurs, cela n'implique pas de changement, dont un qui ne respecte pas la mesure. Cet agriculteur qui ne l'applique pas, est en agriculture de conservation depuis 10 ans. Il justifie ce choix par l'importance d'épandre de l'azote en hiver pour alimenter sa biomasse du sol et son couvert qui restitueront cet azote au moment des besoins de la culture suivante.

En parallèle, cinq agriculteurs ont décalé leur date d'épandage et un agriculteur a privilégié l'implantation de l'orge vis-à-vis du blé, moins sensible à une carence en azote, selon lui (cf. Tableau 3.4). Ce report de la date d'épandage entraîne une augmentation de la dose appliquée pour « compenser » selon ces cinq agriculteurs le manque d'azote en hiver.

Cette mesure *Période* présente pour sept agriculteurs une contradiction avec le raisonnement de leur fertilisation, et donc une mise en œuvre non optimale pour protéger la qualité des eaux souterraines.

Tableau 3. 4: Diversité d'insertion des mesures aux contraintes spatio-temporelles et leur Impact Structurel (IS)

Mesure	Application		Changement	Nb	
	Avant	Après		EA /8	IS
Période	<i>Épandage de l'azote minéral sur blé mi-février</i>	<i>Épandage de l'azote minéral sur blé mi-février</i>	Pas de changement – O8	1	-
		<i>Épandage de l'azote minéral en hiver</i>	Non-respect – O5	1	-
	<i>Épandage de l'azote minéral en hiver</i>	<i>Épandage d'azote minéral après le 15.01</i>	Changement de date – O1, O2, O4, O6, O7	5	II
		<i>Épandage d'azote minéral après le 15.01 avec augmentation de la surface en orge</i>	Changement de date et de culture – O3	1	III
Stock	<i>Pas d'élevage</i>		<i>Non concerné</i> – O1, O2, O3, O4, O5, O6, O8	7	-
	<i>Conservation du fumier en étable</i>	<i>Vente du surplus de fumier aux agriculteurs voisins</i>	Changement de relations inter-exploitant – O7	1	I
Zone	<i>Pas de zone rapprochée sur l'AAC</i>		<i>Non concerné</i>	8	-

Les mesures de la charte sont portées par un animateur de la chambre d'agriculture d'Oraison. Le contenu de ces mesures est peu spécifique et laisse une grande marge de manœuvre aux agriculteurs pour les appliquer. Pour la mesure de diversification de la rotation (*Div*), une réunion d'agriculteurs a permis de faire ressortir des cultures intéressantes à implanter car associées aux aides de la Politique Agricole Commune (PAC), les protéagineux. Des essais ont été faits pour le pois, qui n'ont pas été concluants du fait d'une pression par les sangliers et d'un mauvais rendement. La culture essayée et adoptée par les 4 agriculteurs en conventionnels sur l'AAC est le soja ou soja déroché (cf. Tableau 3.5). Concernant les formations proposées, 5 agriculteurs y ont participé. Ces formations leur ont apporté des connaissances pour diminuer les pesticides, avec l'ajout d'adjuvants qui diminue la concentration en pesticides épandus et l'adoption des bonnes pratiques (*e.g.* épandre de bonne heure les pesticides avec une bonne hygrométrie et avant l'arrivée des abeilles) (cf. Tableau 3.5).

Tableau 3. 5 : Diversité d'insertion des mesures de la Charte et leur Impact Structurel (IS)

Mesure	Application		Changement	Nb	
	Avant	Après		EA /8	IS
Div	<i>Pas signé la Charte</i>		<i>Non concerné – O8</i>	1	-
	<i>Rotation longue car en agriculture de conservation</i>	<i>Rotation longue car en agriculture de conservation</i>	Pas de changement – O2, O4, O5	3	-
	<i>Principalement maïs, blé et tournesol</i>	<i>Principalement maïs, blé, tournesol et soja</i>	Insertion du soja dans la rotation – O1, O3, O6, O7	4	III
Intrant	<i>Pas signé la Charte</i>		<i>Non concerné – O8</i>	1	-
		<i>Diminution de l'utilisation des intrants et plus tôt en journée</i>	Diminution des intrants – O1, O2, O3, O4, O6, O7	5	II
	<i>Utilisation des intrants chimiques</i>	<i>Utilisation des intrants en bio-contrôle comme le tabasco</i>	Changement de produits – O5	1	II
Formation	<i>Pas signé la Charte</i>		<i>Non concerné – O8, O7</i>	2	-
	<i>Pas de formation avec la Chambre d'Agriculture (CA)</i>	<i>Pas de formation CA</i>	Pas de changement – O5	1	-
		<i>Formations CA sur les adjuvants</i>	Changement de pratiques – O1, O2, O3, O4, O6	5	II

Enfin, les mesures Couvert, PlanF, SolN et Période ont une application qui présente une meilleure efficacité pour limiter les pressions polluantes en nitrates sur l'AAC de la Plaine des Chères que sur l'AAC d'Oraison. Sur la Plaine des Chères, la coopérative du secteur vend des mélanges de semences pour réussir ses couverts, et propose un service de sous-traitance du plan de fumure et du reliquat azoté associé. Sur l'AAC d'Oraison, aucun technicien n'est référent sur la zone, malgré la présence de deux entreprises de collecte. Ce cas d'étude présente des fortes sécheresses en été et notamment en période de semis de la CIPAN. Tandis que, dans la Plaine des Chères, le climat est continental et donc plus favorable à la mise en place d'un couvert de moutarde par exemple, semences proposées et vendues par la coopérative locale. Seule la mesure FertiN présente une relative homogénéité d'application avec une réduction et un fractionnement des apports d'azote sur les deux cas d'étude.

Par ailleurs, les mesures de la Charte sont appliquées par les agriculteurs des telles manières que celles-ci permettent de diminuer la pression polluante en pesticides sur l'AAC d'Oraison.

2.2.2 Étape 2 : Impact structurel des mesures

On observe que les mesures *PlanN*, *SolN* et *Période*, malgré qu'elles doivent entraîner des changements de pratiques (niveau II), impliquent aucun changement ou seulement une modification des relations inter-exploitations (niveau I). Seules les mesures, *Couvert*, *Période* et *Div*, impliquent un changement au niveau du système de culture (niveau III) ce qui est inhérent aux mesures *Couvert* et *Div*, mais pas pour la mesure *Période* (cf. Tableaux 3.2, 3.4 et 3.5). Ce changement du système de culture lié à l'application de cette mesure matérialise la non adéquation de cette mesure avec l'exploitation agricole.

L'application de ces mesures ne remet pas en question le niveau et l'allocation des ressources des exploitations agricoles (e.g. l'achat d'un nouveau matériel) contrairement au cas de la Plaine des Chères. L'achat d'un matériel en CUMA permet à cinq agriculteurs de semer un mélange de couvert, une application optimale pour diminuer la pression polluante sur les eaux souterraines. Une des mesures de la charte, malgré que cela implique un changement de système de culture (niveau III), a été adopté par la moitié des agriculteurs de l'AAC.

2.2.3 Étape 3 : Cohérence stratégique des mesures

Les objectifs que suivent les agriculteurs de ce cas d'étude, peuvent être classés de la même manière que ceux des agriculteurs de la Plaine des Chères et sont semblables aux objectifs de durabilité ; performance agronomique, économique, sociale et environnementale (cf. Annexe. 5). La plupart des agriculteurs rencontrés ont pour objectif de **réduire les charges** en raison de la conjoncture économique actuelle. Par exemple, les trois agriculteurs qui sont en agriculture de conservation produisent des semences de ferme pour développer leur couvert. Cette stratégie explique que les mesures qui impliquent un coût supplémentaire (e.g. *SolN*, *PlanF*) sont les plus incohérents avec les stratégies des agriculteurs de l'AAC 'Hippodrome' (cf. Tableau 3.6).

Trois agriculteurs (O2, O4 et O5) ont pour objectif **d'améliorer la qualité des sols** et la mesure *Couvert* est cohérente avec leur stratégie (cf. Tableau 3.6). Sur ce territoire, les huit agriculteurs produisent des cultures à haute valeur ajoutée (e.g. culture de semence) pour permettre **d'augmenter leur marge brute**. L'application de la mesure d'ajustement de la fertilisation, *FertiN*, permet de diminuer les charges sur les intrants azotés sans impacter les rendements et présente donc une cohérence stratégique pour 7 agriculteurs (cf. Tableau 3.6).

Par ailleurs, on observe que les mesures issues de la Charte présentent une cohérence globale avec la stratégie des agriculteurs, mis à part un agriculteur qui a exprimé une incohérence vis-à-vis de l'objectif de diminution du temps de travail (cf. Tableau 3.6).

Tableau 3. 6: Présentation de la cohérence (vert) et l'incohérence (rouge) stratégique de chaque mesure qui résulte de l'opinion de l'agriculteur sur les bénéfices agronomiques (en foncé) et les autres performances (économique et sociale et environnementale) (en clair)

	Couvert	Mulch	Bande	PlanF	SoIN	FertiN	Période	Stock	Zone	Div	Intrant	Formation
O1	NON	OUI	NON	NON	NON	OUI	OUI			OUI	OUI	OUI
	NON	NON	NON	NON	NON	OUI	na			NON	NON	na
O2	OUI			NON	OUI	na	NON			OUI	OUI	OUI
	OUI			NON	NON	na	NON			OUI	NON	na
O3	NON	NON		NON	NON	OUI	NON			OUI	OUI	OUI
	NON	NON		NON	NON	OUI	NON			OUI	OUI	OUI
O4	OUI	NON		NON	NON	OUI	NON			OUI	OUI	OUI
	OUI	NON		NON	NON	OUI	NON			OUI	OUI	OUI
O5	OUI			NON	OUI	OUI	NON			OUI	OUI	OUI
	OUI			NON	OUI	OUI	NON			OUI	OUI	na
O6	NON	NON		NON	NON	OUI	NON			OUI	OUI	OUI
	NON	NON		NON	NON	OUI	NON			OUI	OUI	NON
O7	OUI			OUI	NON	OUI	OUI	OUI				
	OUI			NON	NON	OUI	NON	OUI				
O8				OUI	OUI	OUI	OUI			OUI	OUI	
				OUI	OUI	OUI	OUI			NON	NON	

Ainsi, l'application peu efficace des mesures PlanF, solN et Couvert sur ce cas d'étude répond à une logique de diminution des charges. La majorité des agriculteurs sur cette AAC sont sceptiques quant à la cohérence des mesures de la DN pour protéger la qualité des eaux souterraines, contrairement aux agriculteurs de la Plaine des Chères. Au contraire, les mesures de la Charte qui sont issues d'un processus réglementaire et participatif présentent, selon les sept agriculteurs qui ont signés la charte, des bénéfices agronomiques.

2.2.4 Étapes 4 & 5 : Adéquation des mesures et typologie des agriculteurs

L'adéquation d'une mesure avec le fonctionnement d'une exploitation agricole est le résultat du croisement de son impact structurel après application et de la cohérence de cette modification structurelle avec la stratégie de l'agriculteur (cf.§ 1.3.2). Des résultats présentés dans le Tableau 3.7, on distingue trois types d'exploitants agricoles en fonction de l'adéquation des mesures pour la protection de la qualité des eaux souterraines avec le fonctionnement de leur exploitation.

Tableau 3. 7: Résultat de l'adéquation de chaque mesure étudiée issue de la réglementation pour la protection de la qualité de l'eau avec le fonctionnement global de chaque exploitation agricole cultivant sur l'AAC hippodrome

EA	Couv ert	Mulch	Band e	PlanF	SoIN	Ferti N	Période	Stock	Zon e	Div	Intra nt	Format ion	'Forte' + 'NC'	Typ e
O5	Forte	NC	NC	Faible	Forte	Forte	Faible	NC	NC	Forte	Forte	Mod.	9	I
O7	Mod.	NC	NC	Mod.	Faible	Forte	Mod.	Forte	NC	NC	NC	NC	8	I
O8	NC	NC	NC	Forte	Forte	Forte	Forte	NC	NC	Faible	Mod.	NC	10	I
O2	Forte	NC	NC	Faible	Mod.	Mod.	Faible	NC	NC	Forte	Mod.	Mod.	6	II
O4	Forte	Faible	NC	Faible	Faible	Forte	Faible	NC	NC	Mod.	Forte	Mod.	6	II
O1	Très faible	Mod.	Mod.	Faible	Faible	Forte	Mod.	NC	NC	Mod.	Mod.	Mod.	3	III
O3	Très faible	Très faible	NC	Faible	Faible	Forte	Très faible	NC	NC	Mod.	Forte	Mod.	5	III
O6	Très faible	Très faible	NC	Faible	Faible	Forte	Mod.	NC	NC	Mod.	Forte	Faible	5	III

Type I – forte adéquation

Trois agriculteurs (O5, O7, O8) sont qualifiés de type I car les mesures sont en **forte adéquation** avec le fonctionnement de leur exploitation (cf. Tableau 3.7). Les agriculteurs O5 et O8 présentent une sensibilité à la protection de l'environnement. O5 est en agriculture de conservation et utilise des techniques de bio-contrôle pour substituer les produits chimiques alors qu'O8 a une partie de son exploitation en agriculture biologique. L'objectif de **protection de l'environnement** est en cohérence avec celui de protéger la qualité des eaux souterraines porté par les mesures et qui est notamment un objectif suivi par quatre agriculteurs du type I de l'AAC de la Plaine des Chères (A2, A4, A9, A14). Enfin l'agriculteur O7 présente une activité équestre principale. L'atelier grandes cultures est une activité secondaire, qui explique que les mesures sont peu contraignantes face à son **activité principale**, que présente notamment l'agriculteur A11 de la Plaine des Chères (activité d'héliciculture).

Type II – Adéquation intermédiaire

Deux agriculteurs (O2 ; O4) sont qualifiés de type II car les mesures sont en **adéquation limitée** avec le fonctionnement de leur exploitation (cf. Tableau 3.7). Ces deux agriculteurs O2 et O4 sont en agriculture de conservation à la fois pour suivre une **performance agronomique** mais aussi et principalement pour **diminuer le temps de travail**. L'agriculteur O2 prépare sa retraite et se déplace vers Lyon le plus souvent. Tandis que l'agriculteur O4 tient une **seconde activité chronophage**, la sous-traitance de travaux agricoles. Ces deux agriculteurs ne veulent pas investir plus de temps dans leur atelier grandes cultures qui est pourtant importante, de la même manière que les quatre agriculteurs de type II de l'AAC de la Plaine des Chères.

Type III – Faible adéquation

Trois agriculteurs (O1, O3, O6) sont qualifiés de type III car le fonctionnement de leur exploitation est en **faible adéquation** avec les mesures (cf. Tableau 3.7). L'agriculteur O1 est à la retraite, comme les agriculteurs A1 et A13 de type III de la Plaine des Chères, et ne souhaitent pas changer ses pratiques. Les agriculteurs O3 et O6 sont en agriculture conventionnelle, et ont pour objectif principal la **diminution des charges**, identique à celui des agriculteurs A3 et A13 de type III de la Plaine des Chères.

L'application des quatre étapes de la méthodologie présentée dans l'article 1 sur un deuxième cas d'étude, l'AAC 'Hippodrome', permet de consolider l'analyse de l'adéquation des mesures de la DN avec le fonctionnement des exploitations agricoles. On voit se dessiner divers déterminants généraux à la diversité d'application de ces mesures et de leur efficacité pour diminuer la pression polluante sur les ressources en eau. Le cadre d'analyse d'une exploitation, composée de sa structure et de sa stratégie, a permis d'identifier des types d'exploitation agricole qui présentent des caractéristiques identiques sur les deux cas d'étude. Cette généralité permet de conclure sur la pertinence de la méthodologie développée.

Par ailleurs, les résultats montrent un statut particulier des mesures de la Charte. En effet, elles présentent une homogénéité de mises en œuvre et une cohérence stratégique avec les sept agriculteurs concernés. Le fait qu'elles soient issues d'un processus participatif pourrait expliquer ces résultats.

La suite présente une synthèse de l'analyse des mesures issues de la politique de l'eau afin de ressortir les déterminants de la diversité de leur application et de monter en généralité à partir des descriptions des types d'exploitations agricoles issus du cadre d'analyse.

3. SYNTHÈSE DE L'ANALYSE DE LA POLITIQUE DE L'EAU SUR LES DEUX TERRAINS

3.1 Les cinq déterminants de la diversité d'application des mesures de la DN

L'analyse de l'adéquation des mesures de la DN avec le fonctionnement des 22 exploitations agricoles a révélé des déterminants intrinsèques au **fonctionnement de l'exploitation**. Premièrement, ils sont liés à la **structure** de l'exploitation qui présente une diversité selon la présence **d'une activité en parallèle et sa priorité** face à l'atelier grandes cultures. Deuxièmement, ils sont liés à la **stratégie** de l'agriculteur, plus particulièrement à **son objectif principal**, et sa sensibilité face à la **protection de l'environnement**. Il s'agit de la façon dont les agriculteurs combinent préoccupations économiques et environnementales, résultats similaires avec ceux concernant les stratégies de protection des pommes (Pissonnier et al., 2016). Ces déterminants ont permis d'identifier trois types d'exploitations agricoles, en fonction de l'adéquation des mesures issues de la politique de l'eau avec le fonctionnement de leur exploitation, et présentés par la suite.

Par ailleurs, la comparaison des résultats des deux cas d'étude, a permis de dévoiler des déterminants exogènes au fonctionnement de l'exploitation agricole. Ils permettent d'orienter la diversité de leur mise en œuvre et de leur efficacité pour diminuer la pression sur la qualité des eaux souterraines. Le premier déterminant est le **contexte socio-économique**, plus particulièrement les acteurs professionnels agricoles présents sur le territoire. La présence **d'un conseiller fortement implanté** sur le territoire peut être garant d'une mise en œuvre optimale pour protéger la qualité des eaux souterraines comme c'est le cas sur l'AAC de la Plaine de Chères. Les autres déterminants sont les **contextes climatique et agronomique**. La présence de forte sécheresse en fin d'été et début d'automne et/ou une texture argileuse du sol limitent l'application optimale des mesures orientées sur la couverture du sol en automne.

L'identification de cinq déterminants à la diversité de mise en œuvre des mesures de la DN et de leur efficacité pour diminuer la pression polluante révèle l'incohérence d'une standardisation des mesures pour tous les territoires à enjeu eau et les types d'exploitation. C'est pourquoi, il est intéressant de regrouper les exploitations agricoles lié à leur fonctionnement, afin de concevoir un panel de mesures cohérentes et associés à chaque type d'exploitation.

3.2 Proposition pour une typologie générique des exploitations agricoles sur des zones à enjeu eau et vérification du lien adéquation/abandon

Cette première partie de thèse s'est développée autour d'une hypothèse globale ; la généralisation des mesures, à tous les types d'exploitation agricole, les rend en partie inadéquates avec le fonctionnement des exploitations agricoles sur les zones à enjeu eau. Cela sous-entend que si les mesures ne sont pas en adéquation, alors elles peuvent être **abandonnées dès que possible** (changement/arrêt de la réglementation), et de fait inefficaces dans la durée.

Liés à l'amélioration de la qualité des eaux de captage et à des volontés politiques, la commune d'Oraison, en Val de Durance et les communes Quincieux, Ambérieux, les Chères, Chasselay et Saint Germain au Mont d'or à la Plaine des Chères ne sont plus classées en ZVN depuis respectivement fin 2016 et septembre 2017. Nous avons donc réalisé une enquête téléphonique (cf. Annexe 5) auprès des 22 agriculteurs afin de savoir si les mesures de la DN restaient tout de même appliquées dans leur exploitation agricole.

Les résultats sont représentés sous forme de radars pour les 22 exploitations agricoles étudiées, regroupées par type (cf. Encadré 3). Les mesures accompagnées d'une étoile rouge sont celles qui sont abandonnées par les agriculteurs.

Encadré 3: Instruction pour la construction et lecture des radars

Le radar représente l'impact structurel (ligne bleue) des mesures sur l'exploitation agricole et leur cohérence stratégique (ligne rouge). Nous avons quantifié l'impact structurel de niveau I, II, III et IV par respectivement 1, 2, 3 et 4 et la cohérence stratégique 'forte', 'modeste' et 'fragile' respectivement par +1, 0 et - 1. Donc si la ligne bleue est proche du centre du radar, délimitée par une ligne fine pointillée (aucun impact (0)), l'impact structurel est faible. Si la ligne rouge est au-dessus de la ligne bleue, la mesure est cohérente avec la stratégie de l'agriculteur et au contraire, si elle est en dessous, elle n'est pas cohérente. Le carré blanc sans et avec contour bleu (ex : O5 ; cf. Figure 3.XXX) illustre respectivement le fait que l'agriculteur ne soit pas concerné par la mesure, ou ne la respecte pas et donc ne l'implémente pas.

Tableau 3. 8: Présentation des caractéristiques principales des 22 exploitations agricoles regroupées selon l'adéquation des mesures avec leur fonctionnement et résultat du nombre de mesures abandonnées par groupe de mesure

EA	Date	Système	Objectif principal	Activité principale	Activité secondaire	Élevage	Nb de mesures abandonnées			Type
							Couverture du sol (/3)	Gestion de la fertilisation (/3)	Contraintes spatio-temporelles (/3)	
A4	1995	I	Protection de la biodiversité/réduction des intrants	Grandes cultures	Maraîchage (cardon)		1			
A9	2011	II	Améliorer la fertilité des sols	Grandes cultures	Arboriculture de ses parents					
A2	1988	II	Améliorer la fertilité des sols	Grandes cultures	Maraîchage	24 génisses	1			
A14	2006	I	Améliorer la fertilité des sols	Grandes cultures	Arboriculture					I
O5	1986	II	Améliorer la fertilité des sols	Grandes cultures	Recherche avec Arvalis			1		
A11	1993	I	Augmentation du revenu	Héliciculture	Prairie permanente	Héliciculture				
O7	2011	I	Augmentation du revenu	Activité équine	Grandes cultures	20 chevaux		2		
O8	2001	I	Autonomie financière	Oliveraie	Grandes cultures	20 vaches allaitantes				
A7	2004	I	Augmentation du revenu	Élevage avicole	Grandes cultures	40 poulets/sem. + œufs	1			
A8	1986	II	Diminution des charges	Production de jus de fruit	Grandes cultures		1	3		
A6	1997	I	Augmentation du revenu	Arboriculture	Grandes cultures		2			
A10	1997	I	Augmentation du revenu	Distillerie	Grandes cultures	11 vaches allaitantes	2	2		II
O2	1989	II	Diminuer le temps de travail	Déplacement personnel à Lyon	Grandes cultures			2	1	
O4	2005	II	Diminuer le temps de travail	Prestation de travaux agricoles	Grandes cultures		1	2	1	
A12	2004	I	Augmentation de la marge brute	Grandes cultures	Arboriculture de ses parents		2			
A1	1980	I	Rigueur technique	Grandes cultures	-		2	1		
A5	1987	I	Augmentation de la marge brute	Grandes cultures	Maraîchage (Courge)	120 ovins	2	3	1	
A13	1985	I	Diminuer les charges	Grandes cultures	-		3	3	2	III
A3	1999	I	Diminuer les charges	Grandes cultures	Élevage	120 vaches laitières	3	3	2	
O1	1980	I	Diminuer les charges	Grandes cultures	-		2	2		
O3	1995	I	Diminuer les charges	Grandes cultures	Maraîchage		2	2	1	
O6	1989	I	Diminuer les charges	Grandes cultures	-		2	2		

3.2.1 Type I

Huit exploitations agricoles appartiennent au type I, cinq de l'AAC de la Plaine des Chères et trois de l'AAC d'Oraison et les mesures sont en **forte adéquation** avec le fonctionnement de leur exploitation agricole. On peut observer que sur les huit radars, la ligne bleue est majoritairement au centre du radar (avec ou non un carré blanc) et oscillent entre le niveau 0 et 2, ne dépassant que rarement le niveau 3, un impact structurel considérable (cf. Figure 3.3). Concernant la ligne rouge, qui illustre la cohérence stratégique de ces changements structurels, elle se situe globalement au-dessus de la ligne bleue (cf. Figure 3.3). La mise en œuvre des mesures est donc cohérente avec leur stratégie.

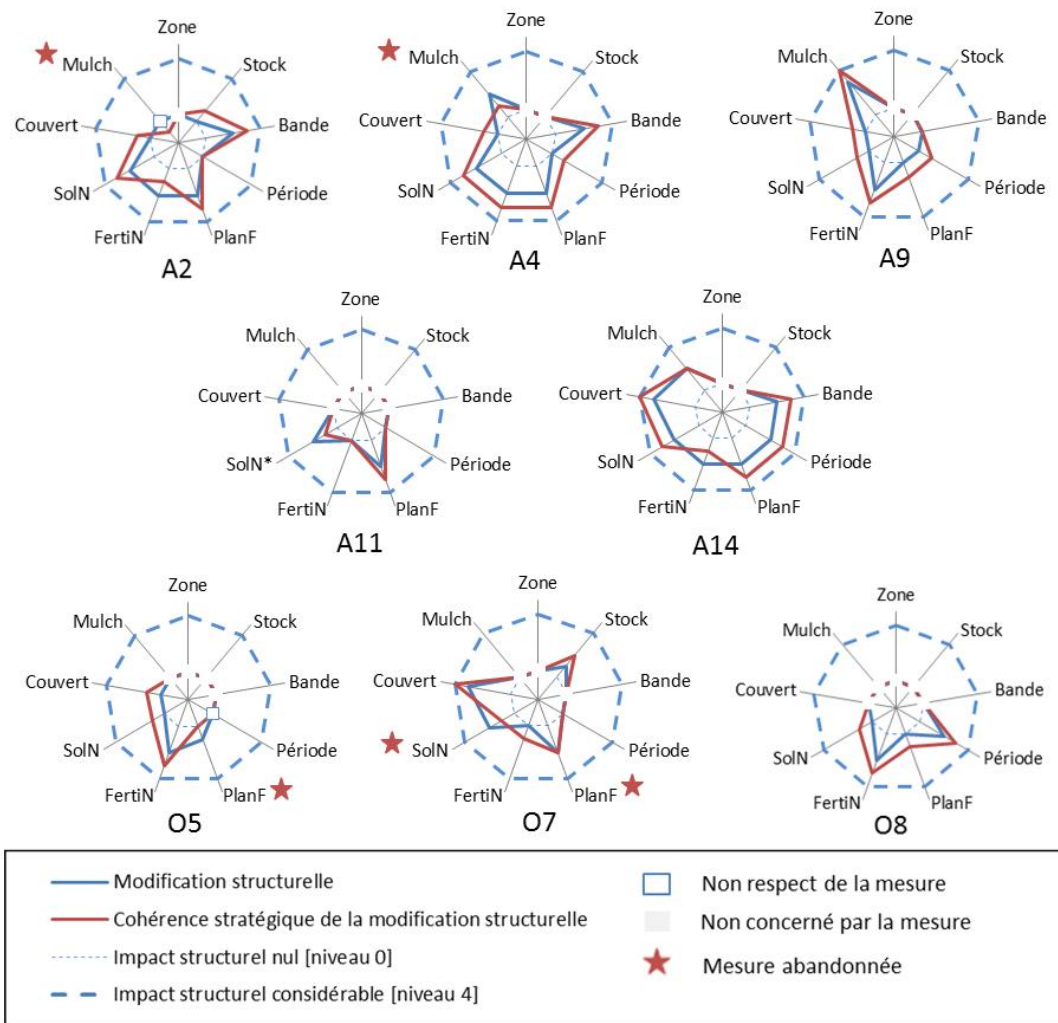


Figure 3. 3: Les radars des exploitations agricoles de type I qui représentent l'impact structurel (en bleu) des mesures après leur insertion dans l'exploitation et leur cohérence stratégique avec la stratégie des agriculteurs (cf. Encadré 3)

Les exploitations de type I présentent deux combinaisons de structure et stratégie. Soit, ils ont une **activité agricole ou non-agricole en parallèle prioritaire** à de celle des grandes cultures, peu importe leur stratégie (cf. Tableau 3.8). Ils investissent peu de temps ni d'argent à l'atelier grandes cultures, limitant par exemple l'apport d'intrants, en cohérence avec la mesure *FertiN*, de diminution des apports azotés. Soit, ils ont comme activité prioritaire, l'atelier grandes cultures, et ont comme **objectif celui de protéger l'environnement**, qui explique la cohérence des mesures avec leur stratégie (cf. Tableau 3.8).

Concernant l'abandon de l'application des mesures, la moitié des agriculteurs de type I ont abandonnés une ou deux mesures (cf. Figure 3.3). Il s'agit de la mesure *Mulch*, car un agriculteur est en agriculture de conservation (O2) et un autre a une stratégie de rigueur technique, en contradiction avec la pratique de mulching qui après une pluie « salit la parcelle » (O4). Deux agriculteurs (O5, O7) qui se situent sur l'AAC d'Oraison, ont abandonné le plan de fumure et parfois le reliquat azoté associé car sceptiques quant à leur pertinence pour améliorer leurs pratiques de fertilisation azoté.

3.2.2 Type II

Six exploitants sont de type II, quatre de l'AAC 'Plaine des Chères' et deux de l'AAC 'Hippodrome' et les mesures de la DN sont en **adéquation limitée** avec le fonctionnement de leur exploitation. On peut observer que sur les six radars, la ligne bleue oscille entre les niveaux d'impact 0 et 2, à l'exception de la mesure 'couvert' qui atteint le niveau 4 pour trois agriculteurs (A6, A7, A10) (cf. Figure 3.4). L'insertion des mesures de la DN impliquent globalement des changements légers d'un point de vue structurel pour les agriculteurs de type II. Concernant la ligne rouge, elle se situe majoritairement en dessous de la ligne bleue (cf. Figure 3.4). L'insertion des mesures est donc globalement incohérente avec leur stratégie.

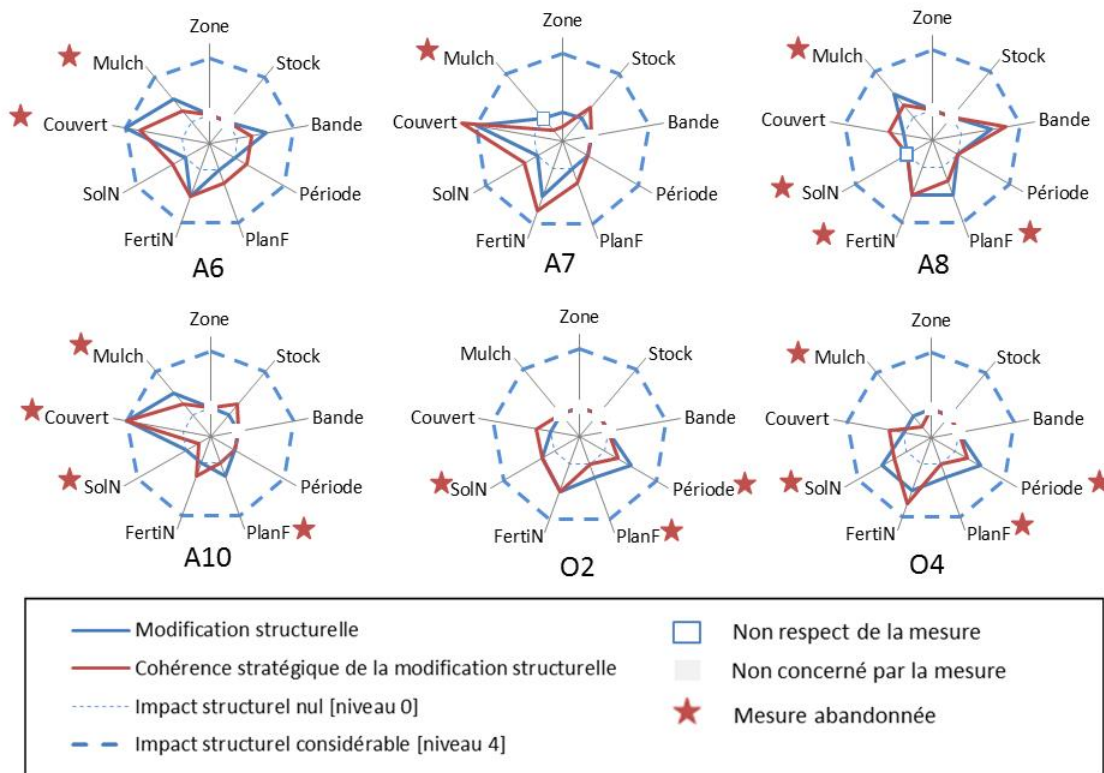


Figure 3. 4: Les radars des exploitations agricoles de type II qui représentent l'impact structurel (en bleu) des mesures après leur insertion dans l'exploitation et leur cohérence stratégique avec la stratégie des agriculteurs (cf. Encadré 3)

Les exploitations concernées sont composées d'un **atelier grandes cultures** et d'un **atelier parallèle tout aussi important** d'un point de vue économique et temporel et qui présentent une **sensibilité vis-à-vis de la protection de l'environnement** (cf. Tableau 3.8). Du fait des contraintes temporelles liées à l'atelier parallèle, suivant les années et conditions climatiques, les agriculteurs sont contraints de ne pas appliquer

les mesures (e.g. pas de mulching après la récolte de maïs sur des terres sèches si la pluie n'arrive pas (A7)) ou de façons inefficaces, pour être dans les règles, vis-à-vis de la protection de la qualité des eaux souterraines.

Cette concurrence temporelle des pratiques issues des mesures de la DN avec leur atelier parallèle chronophage, explique que certaines des mesures ne sont plus appliquées suite à l'arrêt de la désignation en ZVN (cf. Tableau 3.8). Les mesures *Couvert'* et *Mulch* sont les plus abandonnées (5 agriculteurs sur 6) du fait d'un impact structurel important, et *PlanF* (4 agriculteurs) qui impose « trop d'administratif pour des pratiques qu'on faisait déjà » (O8) (cf. Figure 3.4).

3.2.3 Type III

Huit agriculteurs sont de type III, cinq de l'AAC 'Plaine des Chères' et trois de l'AAC 'Hippodrome', et les mesures de la DN sont en **faible adéquation** avec le fonctionnement de leur exploitation. Ces six radars, la ligne bleue est le plus souvent éloignée du centre du radar, et parfois proche de la limite, niveau 4. Ces impacts considérables sont majoritairement associés aux mesures *Couvert*, *Période*, et *Zone* (cf. Figure 3.5). Concernant la ligne rouge, elle se situe majoritairement en dessous de la ligne bleue (cf. Figure 3.5). L'application des mesures est donc globalement incohérente avec la stratégie des agriculteurs de type III.

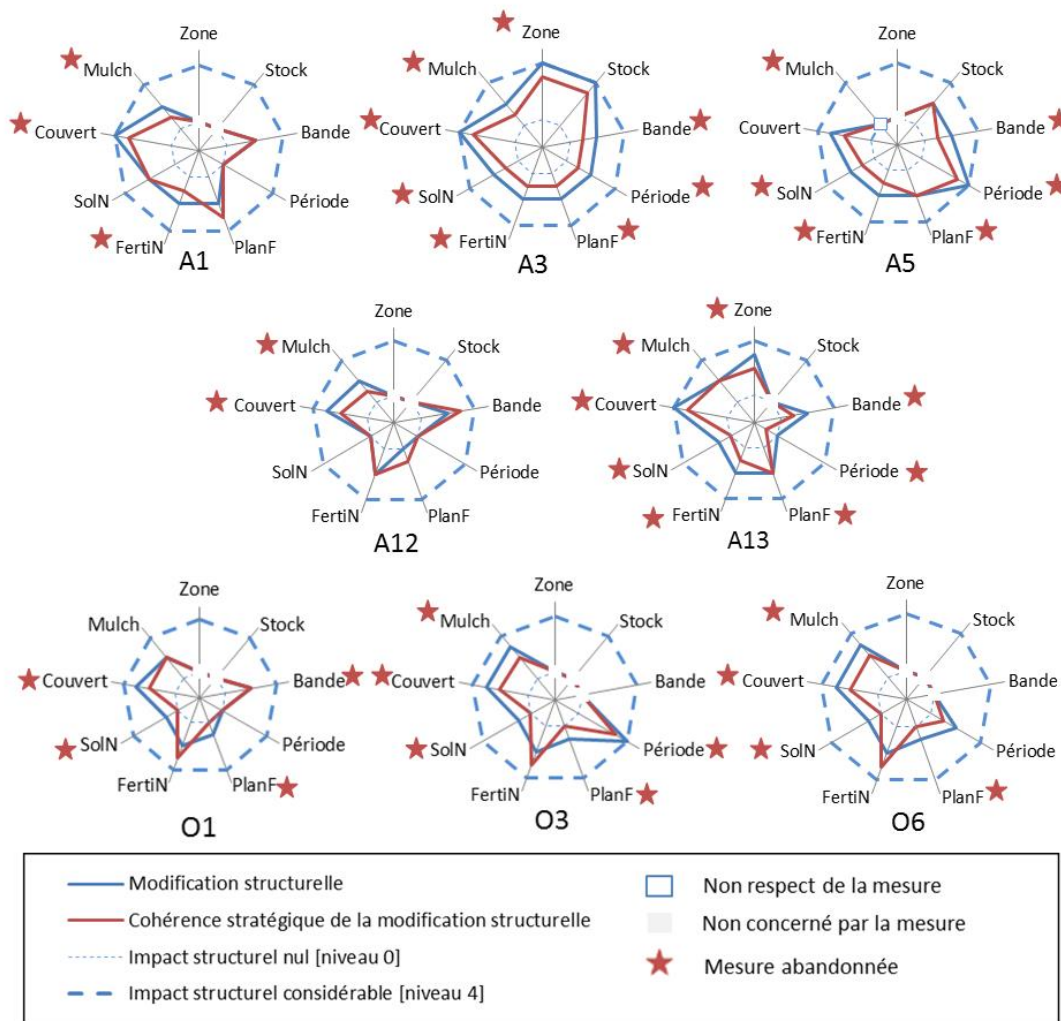


Figure 3. 5: Les radars des exploitations agricoles de type III qui représentent l'impact structurel (en bleu) des mesures après leur insertion dans l'exploitation et leur cohérence stratégique avec la stratégie des agriculteurs (cf. Encadré 3)

Les exploitations de type III sont caractérisées par **un atelier grandes culture seul ou prioritaire** associé à un objectif principal, celui de la **performance économique** (cf. Figure 3.5). On retrouve notamment les agriculteurs qui présentent un atelier élevage important (cf. tableau 3.8).

Cette forte inadéquation avec le fonctionnement de l'exploitation de type III explique que, la plupart des mesures sont abandonnées suite à l'arrêt de la désignation en ZVN (cf. Tableau 3.8). Celles qui engendrent des coûts supplémentaires, *Couvert* et *Mulch* ont immédiatement été abandonnées par les 8 agriculteurs tandis que les mesures qui engendrent un gain en marge nette, comme la mesure *FertiN* (car une diminution des intrants azotés sans impact sur le rendement) sont toujours appliquées par la moitié (cf. Figure 3.5).

Les premiers résultats de thèse démontrent que l'application et l'adéquation des mesures issues de la politique de l'eau sont très variables en fonction des types d'exploitation et des contextes socio-environnementaux, climatiques et agronomiques.

Pour la plupart des exploitations agricoles étudiées sur les deux terrains, l'adéquation de ces mesures est relativement moyenne ou faible avec leur fonctionnement. Cela signifie que les mesures de la DN ne sont pas appliquées de façon optimale pour protéger la qualité des eaux souterraines (*e.g.* semi de fonds de sac comme couvert sans irrigation sous climat méditerranéen), et sont abandonnées dès que possible lors de l'arrêt de la désignation en ZVN. Ces résultats peuvent donc expliquer que la politique de l'eau actuellement proposée ait une efficacité partielle pour protéger la qualité des eaux souterraines. Des recommandations associées au type d'exploitation sont proposées :

Pour les agriculteurs de type I, l'application des mesures semble optimale pour protéger et reconquérir la qualité des eaux souterraines. De plus, elles restent appliquées malgré la fin de la réglementation. Aucune recommandation supplémentaire n'est donc proposée.

Les agriculteurs de type II sont sensibilisés à la protection de l'environnement mais avec un atelier chronophage, en parallèle de leur atelier grandes cultures, qui limite la cohérence stratégique des mesures de la DN. Certaines mesures qui impliquent une concurrence temporelle ont donc été abandonnées suite à la fin de la réglementation. Il serait donc cohérent, pour ce type d'exploitation, de développer une nouvelle réglementation avec des mesures à obligation de résultat plutôt que de moyens (cf. Figure 3.6). Ce changement de paradigme de la réglementation leur permettrait de choisir les moyens appropriés et adaptés à leur situation et au fonctionnement de leur exploitation (Ravier et al., 2015a; Sabatier et al., 2012), afin de protéger la qualité des eaux souterraines. Les mesures à obligation de résultats ont prouvé leur efficacité pour atteindre des performances écologiques (*e.g.* implantation d'une prairie fleurie) (de Sainte Marie, 2014) et environnementales souhaitées (Matzdorf and Lorenz, 2010). Une piste complémentaire est de les impliquer dans un processus de démarche de co-conception, pour concevoir des propositions de changement en adéquation avec le fonctionnement de leur exploitation agricole (cf. Figure 3.6).

Enfin, les agriculteurs de type III sont peu sensibilisés à la qualité des eaux souterraines et ne voient pas l'intérêt des mesures issues de la Politique de l'eau pour la protéger. La recommandation serait soit d'accompagner la nouvelle réglementation avec une formation-action (un processus éducatif où l'agriculteur étudie ses propres actions ou expériences (grâce à un lysimètre par exemple) sous le questionnement itératif d'un accompagnateur professionnel ou tuteur) afin d'expliquer le phénomène complexe de lixiviation des nitrates et pesticides vers les nappes et la cohérence des mesures pour répondre à cet enjeu (cf. Figure 3.6). Soit de mettre en place, comme pour les agriculteurs de type II, une démarche de co-conception afin d'orienter la recherche de solutions cohérentes tant en matière de fonctionnement de ces exploitations agricoles que de protection de la ressource en eaux souterraines (cf. Figure 3.6).

En effet, la démarche de co-conception est devenue une voie prometteuse, en agriculture, pour élaborer des propositions en adéquation technique, économique et organisationnelle avec les attentes et les possibilités des agriculteurs (Anadón, 2007). Le travail sous forme d'ateliers est un moyen de créer un

espace d'échange entre les acteurs qui possèdent des savoirs divers et qui ne communiquent généralement pas entre eux (Berthet et al., 2015). L'objectif de la deuxième partie de thèse est donc de développer une démarche participative impliquant les agriculteurs pour favoriser des changements dans les exploitations agricoles vers des pratiques agroécologiques. Comme il a été démontré en première partie de thèse, ces propositions doivent être en adéquation avec le fonctionnement des exploitations agricoles afin d'assurer leur pérennité dans le temps tout en permettant de reconquérir et/ou protéger la qualité des eaux souterraines. Il est important ici de comprendre que l'enjeu de cette démarche n'est pas nécessairement de développer des solutions « innovantes » comme est souvent le but des démarches de co-conception (Meynard et al., 2006). Il s'agit ici de concevoir des propositions de changement, allant d'une simple modification de pratique agricole à une modification des ressources et du système dans son ensemble, qui permettent de protéger la qualité des eaux souterraines.

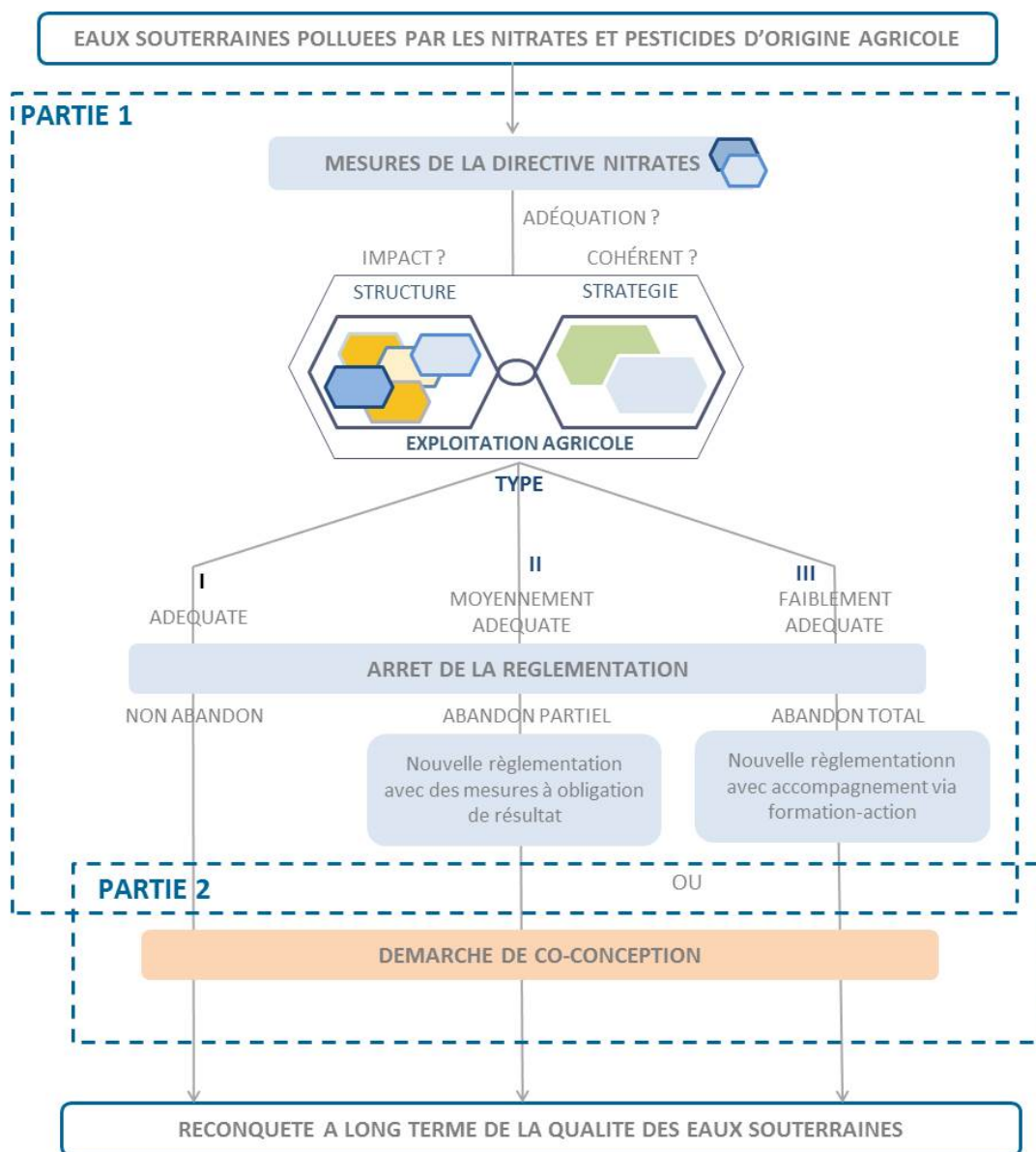


Figure 3. 6: Organisation du manuscrit de thèse avec les résultats du chapitre 3 et l'introduction du chapitre 4. Travail de recherche partant du constat des eaux souterraines polluées pour viser la reconquête à long terme de la qualité des eaux souterraines

Chapitre 4. DÉMARCHE DE CO-CONCEPTION DE SCÉNARIOS SUR-MESURE À L'ÉCHELLE DE L'EXPLOITATION AGRICOLE

Dans ce quatrième chapitre, l'objectif est de mettre au point et appliquer une démarche participative qui permet de **co-concevoir des scénarios en adéquation avec le fonctionnement des exploitations agricoles** permettant de protéger la qualité des eaux souterraines.

Cette partie fait l'objet d'un article soumis le 9 avril 2018 dans « Agricultural system ». Cet article « *A farmer-based method to co-design farming system for groundwater quality protection* » présente la méthode participative et son application avec les deux groupes d'agriculteurs de Val de Durance et de la Plaine des Chères. Les résultats, présentés dans l'article, sont complétés par une présentation détaillée de la méthode d'évaluation multicritère et des leviers principaux pour diminuer la pression sur la qualité des eaux souterraines.

1. MISE AU POINT DE LA METHODE PARTICIPATIVE DE CONCEPTION DE SCENARIOS SUR MESURE ET APPLICATION SUR LES DEUX CAS D'ETUDE

A farmer-based method for co-designing groundwater-friendly agricultural system

Annabelle Richard¹, Marion Casagrande², Marie-Hélène Jeuffroy³, Christophe David¹

¹ISARA Lyon, Département Agroécologie et Environnement, Université de Lyon, 23 Rue Baldassini 69364 Lyon, France

²ITAB - Institut Technique de l'Agriculture Biologique, Ferme Expérimentale, 2485 route des Pécolets 26800 Etoile sur Rhône, France

³UMR Agronomie, INRA-AgroParisTech-Université Paris Saclay, Bâtiment EGER, 78 850 Thiverval-Grignon, France

1.1 Résumé/Abstract

Résumé

Les politiques européennes et françaises présentent une efficacité partielle dans la reconquête de la qualité des eaux souterraines. Les mesures actuellement proposées sont fondées mais ne permettent pas ou peu d'encourager les agriculteurs à changer leurs pratiques à long terme. Des approches participatives ont été développées pour concevoir des systèmes agricoles qui permettent d'améliorer la qualité des eaux souterraines ; les agriculteurs participant parmi les autres acteurs institutionnels dans ces approches. Dans cet article, nous décrivons une approche similaire qui se différencie du fait que seuls les agriculteurs prennent part au processus de conception. Notre méthode comprend cinq étapes et une évaluation multicritère de l'exploitation agricole re-conçue. La place donnée aux agriculteurs est centrale dans la démarche grâce à une alternance entre des sessions individuelles et des ateliers collectifs. L'objectif final est de co-concevoir des scénarios "sur mesure" à l'échelle de l'exploitation agricole qui répondent aux challenge ou projets des agriculteurs en cohérence avec l'enjeu de protection de la qualité des eaux souterraines. Chaque scénario est une combinaison de changements à l'échelle de l'exploitation agricole allant d'un changement de pratiques à celui des ressources matérielles et humaines. Nous avons expérimenté cette méthode avec deux groupes d'agriculteurs provenant de deux territoires à enjeu eau dans le Sud-Est de le France. Les résultats montrent que les agriculteurs ont proposé des recommandations agro-écologiques pertinentes qui sont en adéquation avec le fonctionnement des exploitations agricoles et qui permettraient de protéger voire améliorer la qualité des eaux souterraines. Ainsi, l'expertise collective des agriculteurs a permis de développer des propositions de changements qui encouragent une mise en œuvre de la part des agriculteurs. En effet, certains agriculteurs de ces deux groupes ont mis en œuvre les propositions dans les mois qui ont suivis la démarche.

MOTS CLES : Fonctionnement de l'exploitation agricole, recherche participative, gestion de la qualité des eaux souterraines, 'empowerment'¹³ des agriculteurs

Abstract

French and EU policies have only been partially successful in promoting the restoration of groundwater quality. The currently proposed measures are generally scientifically valid but inconsistent to encourage farmers to change their practices over the longer term. Participatory approaches have been developed for co-designing agricultural systems that improve groundwater quality; farmers are among several stakeholders that make contributions. Here, we describe a similarly oriented participatory approach that includes a key difference: only farmers take part in the co-design process. Our method involves five steps and a multi-criteria analysis of re-design farm management regime. Farmers are empowered via a combination of individual interviews and collective workshops. The ultimate objective is to co-design scenario, a customized farm management regime, that deals with a challenge or objective specified by the farmer and that simultaneously improves groundwater quality. Each scenario is a combination of different farm management change e.g., shifting agricultural practices or cropping systems or material and labor. We tested our method using two groups of farmers from different parts of southeastern France, where there are groundwater quality issues related to nitrate and pesticide pollution. We found that farmers proposed effective, agroecological recommendations that were well suited to current management regimes and that should be able to improve groundwater quality. Overall, this participatory approach makes use of farmers' collective expertise to develop sustainable farm-scale practices that are more likely to be adopted. Indeed, the farmers in the test groups implemented some of the proposed modifications in the months following the co-design process.

KEYWORDS: farm scale, cropping system, participatory research, water quality management, farmer empowerment

1.2 Introduction

Since the 1960s, agriculture has become increasingly intensive and specialized within farms and regions. This shift has resulted in the use of large quantities of synthetic fertilizers and chemical inputs, and the resulting nitrate and pesticide pollution has degraded groundwater quality in sensitive areas¹⁴ (Hénin, 1980; Lopez et al., 2015; Merrington et al., 2002). According to the French Ministry for the Ecological and Inclusive Transition, over 30% of French aquifers are affected by agricultural non-point pollution. Current French and EU policies aiming to limit agricultural pollution have not been entirely successful in improving groundwater quality (Barnes et al., 2009; Brun, 2003; Menard et al., 2014; Oenema et al., 2009). The action plans they propose may be effective at the field scale, but they do not account for farm management diversity. Indeed, they are viewed as inconsistent and not suitable for farm management

¹³ « Il s'agit d'un processus par lequel un individu ou un groupe acquiert les moyens de renforcer sa capacité d'action, de s'émanciper » (Bacqué, 2006)

¹⁴The Drinking Water Directive (Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption) established that, in drinking water, the maximum admissible nitrate concentration is 50 mg NO₃.L⁻¹ and the allowable concentrations of individual and total pesticides (regardless of toxicity) are 0.1 µg/l and 0.5 µg/l, respectively.

strategies and providing inconsistent results (Chantre et al., 2016; Menard et al., 2014; Richard et al., 2018). Consequently, in France, most of the measures are insufficiently adopted by farmers to recover groundwater quality (Kuhfuss et al., 2012). In this context, designing farming practices that would be sustainably implemented and likely to improve groundwater quality has become a major challenge. To meet this challenge, this present research is based on three considerations.

First, designing farming practices addressing the environmental impacts of agriculture calls for systemic approach: each farm's components (cropping system, resources...) and the specific strategy are taken into account from the beginning (Dogliotti et al., 2005; Dorward et al., 2003; Joannon et al., 2006; Lefèvre et al., 2014; Prost et al., 2017). An analysis needs to be performed to determine explicitly how a shift in practices will affect the use of the labor, land, equipment, and capital (Le Gal et al., 2011). A farmer's specific objectives and the particular situation of a farm must also be considered (Dogliotti et al., 2014). This systemic approach at farm scale implies an increased sensitivity to the heterogeneity of farmers and promote a participatory approach (Darnhofer et al., 2010; Thornton and Herrero, 2001).

Second, re-designing farm management means that farmers need to be involved in all stages of the co-design process so that they can assess re-design element suitability. In natural resource management settings, many researchers have developed participatory approaches that include farmers, usually alongside other stakeholders. Farmer involvement can take different forms: approaches vary in how much power is given to farmers to yield knowledge-based influence over the co-design process. It is important to recall that participatory approaches are distinguished by "who defines the research problems and who analyses, generates, represents, owns, and acts on the information that is sought" (Cornwall and Jewkes, 1995). Some participatory approaches diffuse knowledge, technology, or scientifically designed "best practices" to farmers (Buysse et al., 2005; De Buck et al., 1999; Zingore et al., 2009). For example, decision support systems (DSSs) are designed to serve management functions that scientists deem to be potentially useful. However, farmers rarely use agricultural DSSs when defining their management regimes (McCown, 2002). It is for this reason that Vereijken (1999) developed a prototyping method that takes into account farm objectives and conditions (Aarts et al., 2000; Coquil et al., 2009; Stoorvogel et al., 2004a). However, participatory approaches still generally fail to actively involve farmers in the decision-making process (Langeveld et al., 2005) even though farmer involvement is key to successfully designing sustainable farming systems (Dogliotti et al., 2014). Researchers therefore need to ensure that farmers are involved very early on—farmers can assess whether a research-based innovation is a good fit for their management regime (Bonny et al., 2005; Dorward et al., 2003; Martin et al., 2011) or help co-design innovative solutions (Barnaud et al., 2013; Dogliotti et al., 2014; Souchère et al., 2010; Speelman et al., 2014). In these latter two cases, it is clearly recognized that farmers can come up with strategies for managing natural resources by drawing on their own knowledge (Berthet et al., 2015; Doré et al., 2011b; Girard, 2015); involving farmers increases farmer empowerment and regime ownership.

Third, re-designing farm management to enhance their sustainability is a process that should be exclusively farmer driven. In this present research, we consider farmers to be important decision makers, and we recognize that it is more risky for them to adopt practices proposed by socially distant outsiders than by other farmers (Hoffman et al., 2006). Many researchers have emphasized that farmers need to

exchange with their peers, scrutinize the different ideas that arise, and share their experiences in contexts outside the formal arena of agricultural research and development (Curry et al., 2012; Goulet, 2013; Ingram, 2008; Richardson, 2005). In a farmer-focused co-design process, farmers can participate in peer-based discussions where they can share knowledge and receive advice on how to overcome the practical, economic, and social uncertainties they will face if they change their agricultural practices (Cerf et al., 2010; Payette and Champagne, 1997).

Based on these three main considerations, we developed a systemic, farm-scale participatory approach in which farmers co-design farm management regimes. Other participatory approaches aiming to improve groundwater quality have included farmers, but only as one stakeholder group among others. Such approaches have focused on the co-design of (i) cropping systems (Barataud et al., 2016; Hellec et al., 2013; Ravier et al., 2015b) or (ii) combinations of land use at the catchment scale (Allain, 2013; Barataud et al., 2014a; Chantre et al., 2016; De Girolamo and Lo Porto, 2012; Gisclard et al., 2015). However, at present, there is no participatory approach that employs a farm-scale systemic perspective to address groundwater quality issues. The objective of this study was to develop such an approach, in which farmers are the sole co-designers, and to test its ability to yield farm management changes that address challenges or objectives identified by farmers while also improving groundwater quality. In the first part of the manuscript, we describe our method. In the second part of the manuscript, we present the results obtained when we tested the method using two groups of farmers located in southeastern France, where there are groundwater quality issues related to nitrate and pesticide pollution. We then conclude with a global assessment of our methodology and results.

1.3 Material and method

1.3.1 *Individual interviews and collective workshops*

Our participatory approach was inspired by a co-development method designed by Payette and Champagne (1997) that promotes collective learning. Their method begins by allowing participants to describe real-life situations. Guided discussion among peers then helps participants identify changes to individual challenges or establish plans for achieving objectives. In our study, farmers belonged to one of two groups: (i) *recipient* farmers, who wanted to adopt more sustainable management practices and who had a specific challenge or objective in mind and (ii) *adviser* farmers, who had expertise and knowledge that they could use to propose concrete changes to the *recipient* farmers. We employed two types of sessions (Figure 4. 1): individual interviews with just the *recipient* farmers and collective workshops in which *recipient* farmers interacted with *adviser* farmers. In the individual interviews, a facilitator had semi-directed discussions with the *recipient* farmers (Fig 1: steps 1a, 1c, 3a, 3c). Then, the facilitator analyzed the information gathered (Fig. 1: steps 1b, 3b). Two collective workshops were subsequently held (Fig 1: steps 2 and 4), during which farmers shared practical knowledge and information. The goal behind alternating individual and collective interactions was to empower farmers during the co-design process and to increase their ownership of the proposed modifications.

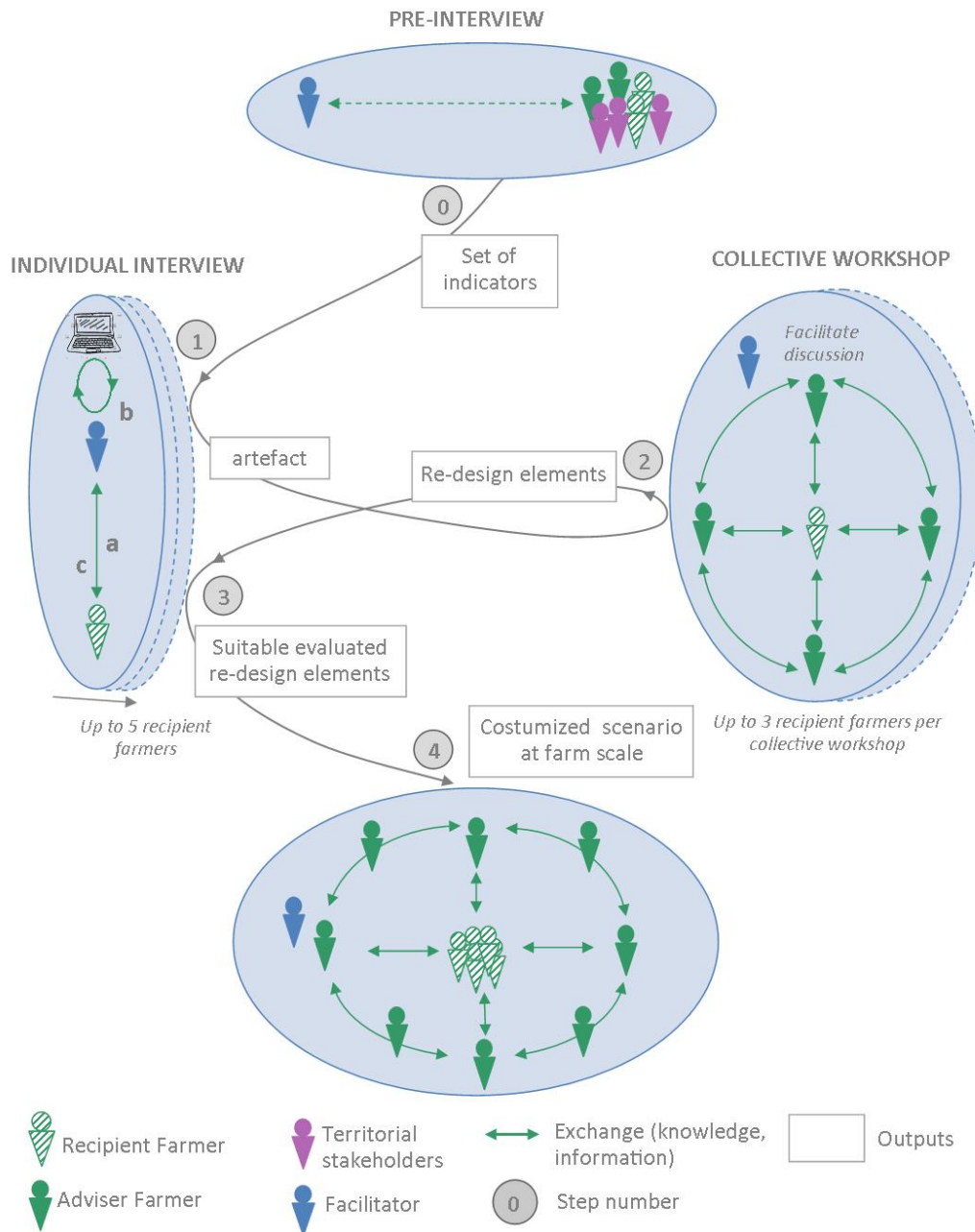


Figure 4. 1: Five steps of the participatory approach described in this study

1.3.2 The method's five steps

Step zero: conducting pre-interviews

We carried out pre-interviews prior to initiating the co-design process. The objective was to (i) define a set of indicators reflecting farm performance and groundwater quality and (ii) identify *recipient* and *adviser* farmers. First, we contacted stakeholders involved in activities ranging from groundwater management to farming; the goal was to assess current agricultural and environmental conditions and to characterize regional diversity in farming systems (Figure 4.1). Second, we initiated dialogues with farmers in the region to determine their willingness to take part in our study and to clarify their specific sustainability challenges or objectives. Promising candidates were chosen to be *recipient* farmers. These two sets of discussions (i.e., with stakeholders and farmers) allowed us to collect information on

environmental, agricultural, economic, and social expectations, which we then translated into farm performance and groundwater quality indicators (Figure 4.1).

Step one: representing the farm management regimes of recipient farmers

The objective of the first step was to create artefact, a visual depiction of the *recipient farmers'* management regimes, which had a structure (e.g., combination of cropping systems, available equipment and labor, and socioeconomic environment) and a strategy (the farmer's overall objectives) (Aubry and Michel-Dounias, 2006). This step comprised three distinct stages. The first stage (1a) was an interview during which *recipient farmers* described the structure and strategy of their farms and detailed their sustainability-related challenge or objective.

During the second stage (1b), we generated the detailed artefact of the *recipient farmers'* management regimes. They contained information about farm structure—the farmer's family, hired labor, equipment, use of land, and cropping systems (noting any instances of interdependence [Figure 4.2]). The *recipient farmers* verbally described their farm strategy during the co-design process.

In the third stage (1c), the artefact was shared with the *recipient farmers*. The goal was to (i) refine/complete the representation and (ii) encourage *recipient farmers* to take ownership of it, as it would serve as the basis for exchanges during the collective workshop. The two interviews (1a and 1c) were thus essential precursors to the first collective workshop (step 2).

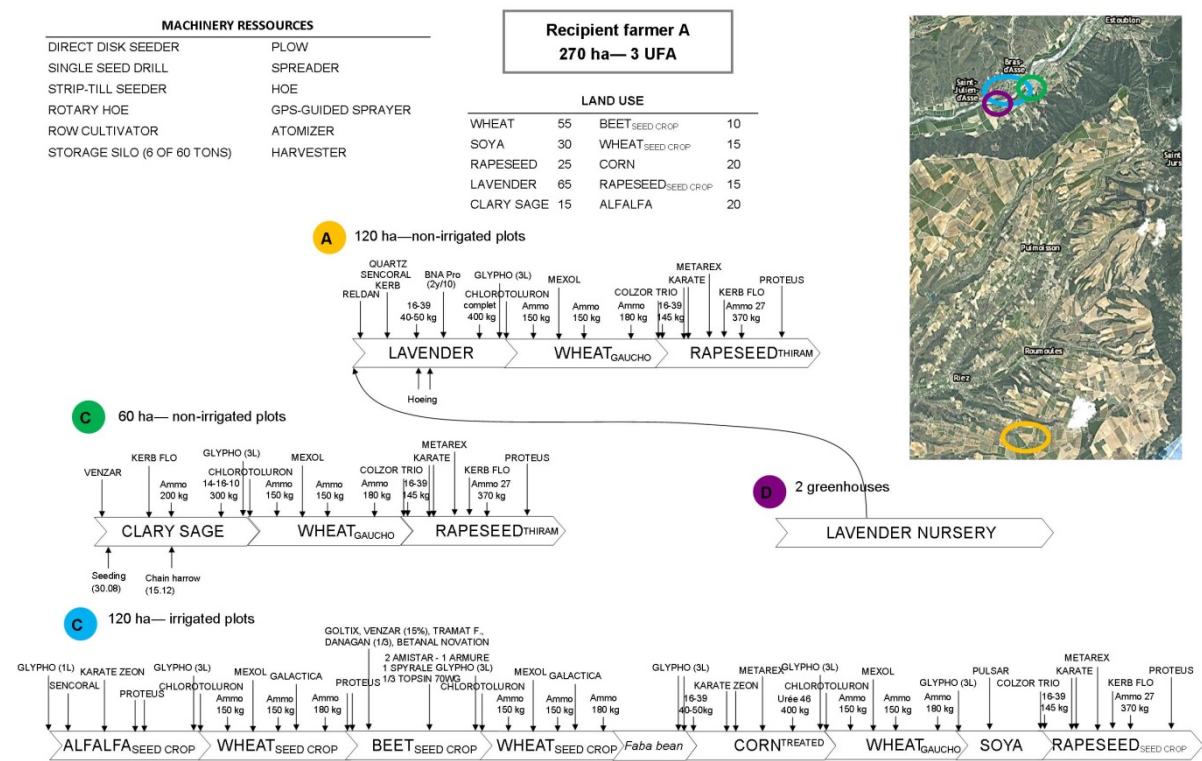


Figure 4. 2: Artefact of *recipient farmer A's* management regime. It represents the farm's equipment, usable farm area (UFA), land use (in hectares), and cropping systems (A, B, C and D; locations shown on map). Crop sequences, cover crops, and key actions are indicated for each cropping system.

Step two: exchanging knowledge and redesigning farm management regimes

The second step consisted of the first collective workshop: *recipient* farmers presented (i) their farm depictions (Figure 4.2) and (ii) their sustainability-related challenges or objectives to three or four *adviser* farmers (Appendix 1). The *adviser* farmers relied on the artefact when suggesting re-design element during the consultation stage of the workshop. Re-design element involved improving techniques already being used (e.g., hoeing at a higher speed); adopting new agricultural practices (e.g., intercropping rapeseed); or modifying a cropping system by either exploiting available equipment/labor or making additional investments. During the co-design process, improving groundwater quality was not treated as an objective but rather as a constraint.

The facilitator adopted a neutral perspective during the workshop—no additional knowledge was given but the discussion was stimulated or refocused if necessary. The facilitator used the artefact as tools for promoting a systemic approach throughout the co-design process; it clearly illustrated that equipment, labor, cropping systems, and agricultural practices (as well as any interactions) that needed to be taken into account.

Step three: pre-selecting suggested changes and assessing redesigned farm management

The third step involved three distinct stages. The first stage (3a) was a third interview with the *recipient* farmers, during which they pre-selected re-design elements that had been proposed during the workshop. Suggested changes that the farmers viewed as appropriate were retained, and a customized re-design farm management, intended for implementation, was created. The interview was structured around the artefact and the transcript of the first collective workshop. During the interview, we assessed the suitability of each suggested changes using an integrative analysis that involved the following steps (Richard et al., 2018):

6. An assessment of the structural impact of implementing the re-design element, taking into account the different suggested changes; we considered that the structural impact was considerable when it affected at least the cropping system and that it was minimal when it did not (Table 4.1)
7. An evaluation of how well the structural modifications fit with the farm strategy and the farmer’s specific challenge or objective

A re-design element’s suitability was defined by its structural impact and its strategic consistency (Table 4.1). For example, it was considered to be highly suitable when it had a slight structural impact and a strong strategic consistency.

Table 4. 1 : Analytical framework for determining the suitability of re-design element for farm management (Richard et al., 2018)

STRATEGIC CONSISTENCY \ STRUCTURAL IMPACT	STRONG <i>Agricultural benefits present</i>	MODERATE <i>Agricultural benefits but inconsistent economic/ social results</i>	WEAK <i>No agricultural benefits</i>
SLIGHT Implementation changes agricultural practices or socio-environmental relationships	HIGH	MODERATE	LOW
CONSIDERABLE Implementation changes cropping system or necessary equipment/labor	MODERATE	LOW	VERY LOW

During the second stage (3b), data processing was performed. Re-design elements defined as suitable were evaluated at the farm scale using a multi-criteria evaluation. We assessed the differences between (i) the *recipient farmer's* current management regime and redesigned versions of the management regime in which single elements had been changed (e.g., one new practice or one new cropping system had been incorporated) and (ii) the current management regime and a redesigned management regime incorporating multiple changes (Figure 4.3).

We characterized agricultural, economic, and social performance (Figure 4.3) using various agro-environmental indicators. Agricultural performance was assessed using crop yield (Y) and soil organic matter content (OMC) modifications. To assess soil organic matter, we used I_{MO} from the INDIGO model (Girardin and Bockstaller, 2002). Economic performance was assessed using total cost (C) and direct margin (DM) modifications. Social performance was assessed using working hours (WH) per hectare per year and the distribution of working hours across the year modification. To assess pressure on groundwater quality by nitrates, we used nitrogen balances (N) which compare N-inputs and N-outputs during whole rotations and the N_2 fixation by legumes (Carlsson and Huss-Danell, 2003). To assess pressure on groundwater quality by pesticides, we used the treatment frequency index of active molecules (TFI_{ma}) that measures the amount of active molecules from pesticides used (Guichard et al., 2010). Differences in the values of these indicators revealed the broader implications of the farm management modifications.

The data used to calculate these six indicators were provided by the *recipient farmers* and local stakeholders. To obtain them, we spoke with a number of key local stakeholders and combed through scientific publications. The objective of this stage was to (i) develop a multi-criteria evaluation method easy to use and (ii) assess the re-design regime's consequences for agricultural, economic, and social performance as well as for groundwater quality.

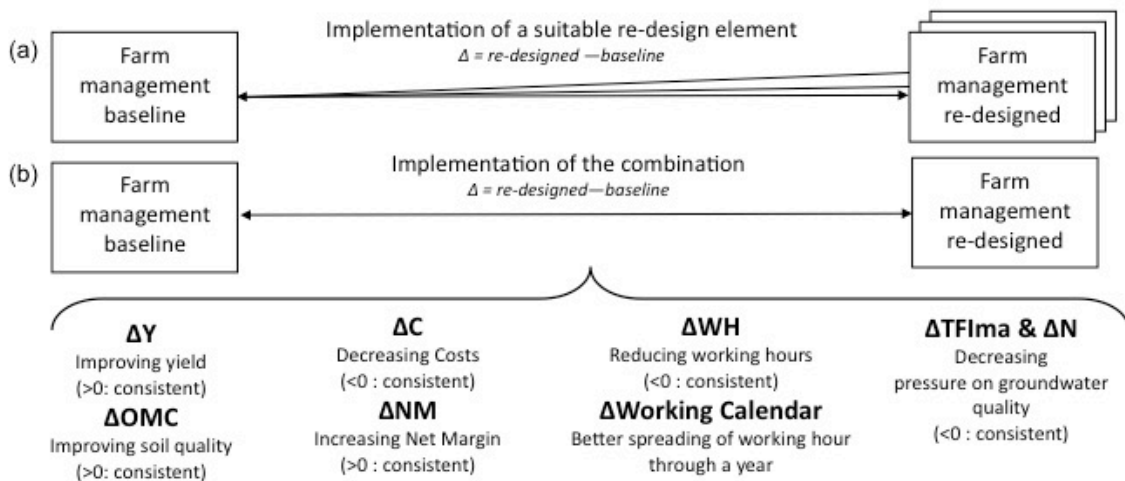


Figure 4. 3: Analysis of the differences between the current farm management regime and (a) re-design farm management regimes incorporating single changes and (b) a redesigned farm management regime incorporating multiple changes

The last stage (3c) was a fourth interview with the *recipient farmers*, during which the results of the analysis were presented. The goal was to (i) provide constructive insight into how each solution could

change farm performance and (ii) allow farmers to take ownership of these findings and present them to other farmers during the second (and final) collective workshop.

Step four: deciding upon management modifications

The fourth and last step was a collective workshop in which *recipient* farmers presented, one by one, their assessments of the different re-design elements and their final combination of choice. The objectives of this step were to (i) allow farmers to compare and contrast strategies to encourage their implementation of the modified farm management regimes and (ii) evaluate the broader applicability of different changes across farms.

1.3.3 Method testing

We tested our method using two groups of farmers from different parts of southeastern France: (1) an area near Oraison (O; 43°54'N; 5°55'E) and (2) an area north of Lyon, near Ambérieux and Quincieux (A; 45°54'N, 4°46'E) (Figure 4.4). In these two areas, there are groundwater quality issues related to nitrate and pesticide pollution.



Farmers in the first group (O) already had plans to reduce pesticide use and adopt more sustainable practices. Farmers in the second group (A) had been identified in a previous study that focused on the suitability of agroenvironmental measures for farm management (Richard et al., 2018). The push to reduce pesticide use did not come from the regional government; instead, the farmers were self-motivated to improve farm sustainability. We focused on five *recipient* farmers from group O and two *recipient* farmers from group A; they represented a diversity of farm management strategies (Table 4.2).

Figure 4. 4: Geographical origins of the study groups

Table 4. 2: Main characteristics of the farms run by the seven focal *recipient* farmers (RF). The table indicates the farmer’s specific challenge or objective, tillage system (I: conventional, II: conservation), cropping systems (CS; land use in ha/irrigation status), usable farm area (UFA; in ha), and annual work units (AWUs).

RF	Challenge or objective	System description	Number			Study group
			UFA	AWU	of adviser farmers	
A	Reducing inputs	CS1 (120/non-irrigated): lavender/wheat/rapeseed	270	3	3	O
		CS2 (30/non-irrigated): clary sage/wheat/rapeseed				
		CS3 (120/irrigated): soybean, wheat, corn, seed crops—beet, rapeseed, alfalfa				
		CS4: greenhouse lavender				
B	Converting a non-irrigated, organically	CS1 (120/irrigated): wheat, soybean, sunflower, seed crop—beet	170	1	4	O
		CS2 (20/non-irrigated): clary sage, wheat				

	farmed parcel to produce organic fodder		CS3 (30/non-irrigated): fallow land, organic wheat Breeding of sheep (35), cows (10), horses (10)				
C	Reducing inputs	I	CS1 (3/non-irrigated & 5/irrigated): olive trees CS2 (8/irrigated): peony flowers CS3 (100/irrigated): wheat, watermelon, seed crops—beets, garlic, sunflower, corn, alfalfa	120	2	3	O
D	Converting a conventional system into an organic system	II	CS1 (2/non-irrigated): sainfoin, wheat CS2 (22/irrigated): pasture CS3 (14/irrigated): alfalfa, faba bean, soybean, seed crop—sunflower Breeding of sheep (20)	38	1	3	O
E	Adding orchard crops	II	CS1 (6/non-irrigated): olive trees CS2 (8/non-irrigated): barley CS3 (14/irrigated): wheat, corn, soybean CS4 (40/irrigated): wheat, corn, soybean, seed crop—beet CS5 (31.5/irrigated): wheat, soybean, thyme, rosemary, savory, oregano, seed crops—alfalfa, wheat CS6 (21.5/irrigated, organically farmed): wheat, corn, barley, lumber CS7 (21/irrigated): fallow land	140	1	3	O
F	Increasing rotation diversity	I	CS1 (25/irrigated): wheat, rapeseed, barley CS2 (45/irrigated): wheat, rapeseed, corn Orchard crops (9/irrigated)	69	3	4	A
G	Improving soil quality	II	CS1 (20/non-irrigated): wheat, sorghum, barley CS2 (65/non-irrigated): wheat, rapeseed, corn, faba bean, sunflower CS3 (4.5/irrigated): vegetables (squash, tomato) CS4 (25/non-irrigated): pasture Breeding of heifers (24)	125	1	4	A

1.4 Results

1.4.1 Diversity of re-design element during the first collective workshop

Various strategies of re-design elements

The seven *recipient* farmers described a range of challenges and objectives, from “reducing inputs” to “developing agroforestry system” (Table 4.2). During the first workshop, a variety of customized changes were proposed (Table 4.3). Two *recipient* farmers did not receive any proposed modifications because they only discussed their current farm management regimes (as well as other topics) without describing a specific challenge or objective.

Table 4. 3: Cropping-system-specific recommendations proposed to different recipient farmers (RF). Solution suitability, selection, and implementation are indicated.

Proposed solution	Suitability?	Selected?	Implemented?
Recipient farmer A: reducing inputs			
Harvesting farm-saved seed for wheat: CS1 & 2	High	Yes: treated wheat seeds are expensive; however, after some discussion, the farmer, his father, and his brother decided to treat their farm-saved seeds with FERAL	Yes (October 2017)
Harvesting farm-saved seed for rapeseed: CS1 & 2	High	Yes: yield is not impacted by the use of farm-saved seeds	Not yet (waiting for August rainfall to sow rapeseed)
Using low-volume treatments: CS1 & 2 & 3	High	Yes: the farmer is very interested in decreasing inputs and increasing input efficiency	Not yet (waiting for training)
Planting faba bean between wheat in non-irrigated fields: CS1 & 2	Mod	Yes: the farmer aims to reduce weed pressure on wheat in non-irrigated fields; therefore, he wishes to break up the rotation	Yes (August 2017)
Planting frost-sensitive interrow cover crop between lavender: CS1	Mod	Yes: in contrast, because the farmer's goal is to decrease soil dryness, the cover crop will be used over the summer to decrease evaporation	Not yet (in a few years)
Intercropping rapeseed with alfalfa: CS2	Mod	Yes: the farmer has the seeds from another cropping system	Not yet (waiting for August rainfall to sow rapeseed)
Intercropping rapeseed with vetch: CS2	Mod	No: since there is no guarantee of a winter freeze, which is needed to terminate the vetch	-
Intercropping rapeseed with barley and rye: CS2	Mod	No: barley is difficult to terminate	-
Replacing chemical pesticides with organic ones (e.g., switch from METAREX® to IRONMAX®): CS1, 2, 3	Mod	No: METAREX works very well	-
Treating alfalfa with castorbean meal to fight wireworms: CS3	Low	No: castorbean meal is expensive, and the farmer has doubts about its efficacy	-
Using a Rodenator® system in alfalfa to fight wireworms: CS3	Very low	No: the machine is very expensive	-
Implementing a mixed cover crop of rye and hairy vetch: CS1	Very low	No: there would be a significant time investment because the fields in question are one hour from main farm	-
Recipient farmer B: converting a non-irrigated, organically farmed parcel (30 ha) to produce organic fodder for sheep, horses, and cows			
Using alfalfa as fodder: CS3	Mod	No: large quantities of alfalfa can kill sheep	-
Using trefoil as fodder: CS3	Mod	No: the seeds are expensive	-
Using dwarf clover as fodder: CS3	Mod	No: the seeds are expensive	-
Spreading compost/Ramial Chipied Wood: CS3	Very low	No: the farmer lacks the right equipment	-
Recipient farmer E: developing agroforestry in his farm			
Planting pistachio trees: CS6	Mod	Yes: the pistachio market seems strong, and an adviser farmer shared the name of a contact who can supply the pistachio trees	Yes (in January 2018)
Planting pomegranate trees: CS6	Mod	Yes: pomegranate trees are small and bushy, so they can be planted between olive trees	Not yet (in 2018)
Planting persimmon trees: CS6	Mod	Yes: the persimmon market is good	Not yet (in 2018)
Planting fig trees: CS6	Mod	Yes: the fig is native to the eastern Mediterranean and thus grows very well under local climatic conditions	Not yet (in 2018)

Recipient farmer F: increasing rotation diversity			
Using Clearfield® corn or sunflower seeds so Pulsar® herbicide can be applied: CS2	High	Yes: <i>adviser farmer touted its efficacy, and it would reduce mechanical weed control frequency</i>	Not yet (in a few years)
Using buckwheat as the rotation's second crop: CS1, 2	Mod	Yes: <i>the farmer wants a crop that does not require much treatment, and an adviser farmer has had a positive experience with buckwheat</i>	Not yet (in June 2018, after the barley)
Using faba bean as a pre-corn cover crop: CS2	Mod	Yes: <i>the farmer aims to improve soil fertility</i>	Not yet (in a few years)
Employing conservation tillage: CS1, 2	Mod	Yes: <i>the farmer aims to improve soil structure but lacks the necessary equipment, making it a longer-term project</i>	Not yet (in a few years)
Adding triticale: CS1	Mod	No: <i>the farmer is unfamiliar with this crop</i>	-
Mixing two rapeseed varieties (an early variety that attracts flea beetles + a variety intended for harvest, Trezzor or Attletick): CS1, 2	Mod	No: <i>farmer is unsure about strategy efficiency</i>	-
Hoeing corn at a higher speed (6–7 miles per hour): CS2	Mod	No: <i>too risky; also, cherry and apricot harvesting takes place during the same period</i>	-
Using buckwheat as a main crop, planted after corn: CS1, 2	Low	No: <i>the net margin for buckwheat is not large enough for it to serve as a main crop</i>	-
Adding chickpea: CS1, 2	Low	No: <i>the farmer has problems with wild pigs</i>	-
Adding flax: CS2	Low	No: <i>this crop requires at least two herbicide treatments</i>	-
Recipient farmer G: improving soil quality			
Adding buckwheat as a second crop and a cover crop: CS1, 2	High	Yes: <i>this crop does not need any chemical inputs</i>	Not yet (in July 2018, after the wheat)
Adding triticale: CS1, 2	Mod	No: <i>the net margin of triticale is less than that of wheat</i>	-

During the workshop, different changes were proposed to help *recipient* farmers address their challenges or objectives. The re-design elements centered around system diversification, the enhancement of natural biodiversity, and improved self-sufficiency.

Several strategies were recommended for increasing system diversification. The most common was adding a new crop to the rotation (*recipient* farmers A, B, F, and G). The goal was to deal with weed resistance, improve soil fertility, or produce organic mixed fodder (Table 4.3). Less common suggestions involved increasing crop diversity (*recipient* farmers A, E, F) by intercropping or by planting orchard crops, cover crops, or diverse crop varieties (Table 4.3). Two strategies for enhancing natural biodiversity were mentioned. First, it was suggested that synthetic herbicides/pesticides be replaced by organic herbicides/pesticides (*recipient* farmer B; Table 4.3). Second, it was suggested that chemical weed treatments be replaced by mechanical weed control (*recipient* farmers A and F; Table 4.3).

Finally, the solution for improving farm self-sufficiency was to use farm-saved seeds for wheat and rapeseed (*recipient* farmer A; Table 4.3).

Re-design elements' suitability for farm management and their selection resulting in customized scenario

Among the five *recipient* farmers to whom changes were proposed, one (B) received recommendations that did not fit with his farm management regime; consequently, he did not implement them (Table 4.3). The other four *recipient* farmers were given between 2 and 12 re-design elements. However, certain suggestions were inappropriate, given the farmers' current management regimes, and were thus not adopted. These changes displayed either low or very low suitability, or they displayed moderate suitability but very uncertain implementation success. *Recipient* farmers A, E, F, and G retained, respectively, 50%, 100%, 40%, and 50% of the suggestions they received (Table 4.3). These included changes deemed to be highly suitable, as well as recommendations that were only moderately suitable but that had minor structural impacts (Table 4.3). *Recipient* farmers A and F quickly put into action some of the highly suitable re-design elements they had selected. Other strategies were to be implemented later, when climatic conditions were appropriate (Table 4.3).

1.4.2 Farm-scale evaluation of customized scenarios

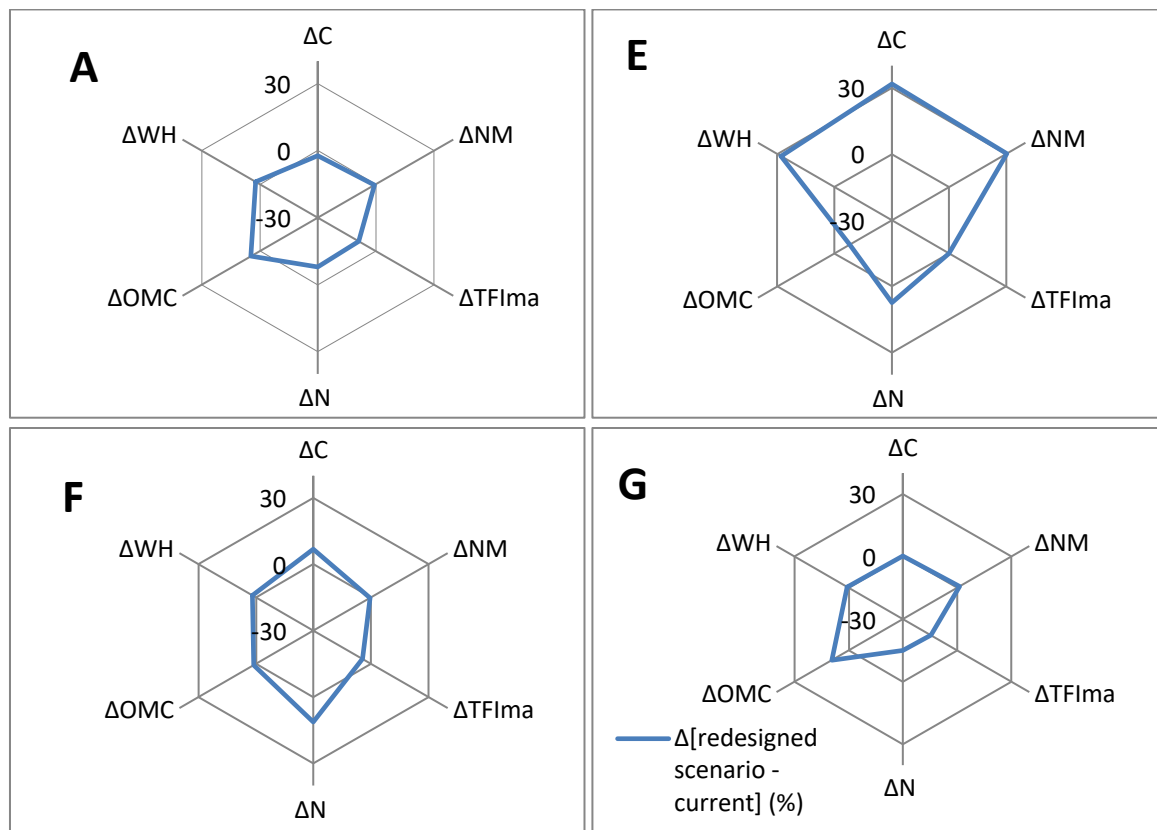


Figure 4. 5: The graphs depict the difference (%) in the indicator values for the current farm management regimes and the re-design farm management regimes (incorporating multiple changes) for the four *recipient* farmers (A, E, F, G) who retained some of the proposed re-design elements. The change in agricultural performance is reflected by the difference in soil organic matter content (ΔOMC). The change in economic performance is reflected by the difference in total cost (ΔC) and net margin (ΔNM). The change in social performance is reflected by the difference in working hours per hectare per year (ΔWH). The change in groundwater quality is reflected by the difference in the nitrogen balance (ΔN) and treatment frequency index of active molecules (ΔTFI_{ma}).

The results for agricultural performance show that soil organic matter content increased by about 5% for *recipient* farmers A, E, and G (Table 5.3). This increase is attributable to the intercropping of the faba bean

cover with lavender (Garcia et al., 2018). Planting legumes such as faba bean before wheat can improve wheat yield by more than 190 kilograms per hectare (Schneider et al., 2010). The increase is also related to the shift toward orchard crops. Agroforestry systems are better able to capture and utilize resources than are single-species cropping systems or grassland systems, and they are thus better at storing carbon (Seddaiu et al., 2013).

For three of the four *recipient* farmers, economic performance was unchanged because of their other farming activities (e.g., *recipient* farmer F's orchards) (Figure 4.5 & Appendix A. Table 4.1). However, for *recipient* farmer E, total cost increased 40%. Given that his objective is to introduce orchard crops onto his farm (on a 22-ha plot), a certain amount of investment is to be expected. There are costs associated with establishing the orchards (which would be recouped over a 10-year period, after which the farmer would be retiring). There are also costs associated with maintaining the orchards (fertilizer, irrigation, and labor to carry out pruning and harvesting). However, the net margin also increased by about 40% thanks to the market values of pistachios, persimmons, and figs. The farmer planned to sell the persimmons and figs himself (Figure 4.5).

The results for social performance show that the addition of buckwheat did not increase working hours for *recipient* farmer F (Table 4.3). In contrast, for *recipient* farmers A and G, there was a 10% increase in working hours (Figure 4.5) because of, respectively, the additional crop on a distant parcel and the addition of buckwheat (Table 4.3). For *recipient* farmer E, the increase was even more dramatic: working hours climbed 35% (Figure 4.5). This pattern is understandable given that, for example, harvesting olives requires an investment of 100 hours per hectare (Table 4.3). However, working hours were better distributed across the year because pistachios, figs, pomegranates, and persimmons are harvested during different periods¹⁵.

Finally, the results for groundwater quality show that the management modifications decreased TFI_{ma} for three of the four *recipient* farmers (Fig. 4.3: A, F, G). The nitrogen balance did not change for *recipient* farmers A and F; however, it increased for *recipient* farmers E and G because of the addition of the orchard crops and the use of an undersown cover crop (Fig. 4.5). For *recipient* farmer E, the fruit trees may reduce nitrate leaching because (i) the tree roots can recover nitrogen from below the zone occupied by the crops' root systems and (ii) water uptake increases (Reisner et al., 2007). For *recipient* farmer G, the addition to the rotation of a second crop, can have the same agronomic benefit as a cover crop and can increase organic matter and decrease nitrate leaching (Garcia et al., 2018). Overall, we can conclude that the *recipient* farmers can improve groundwater quality via increases in organic matter, decreases in TFI_{ma}, or increases in nitrogen balance.

1.5 Discussion

The farmer-focused co-design method we developed was successfully tested using two groups of farmers. However, results varied depending on farm management regime. Here, we discuss how farmers can be encouraged to adopt redesign elements and how to promote regime success. We also highlight some of the limitations of our method.

¹⁵ En effet, on peut observer une répartition au cours de l'année des heures de travail supplémentaires liées à l'implantation du système agroforestier (cf. Annexe 6).

1.5.1 *May this participatory method foster change by farmers?*

Our participatory approach exclusively involves farmers. In this section, we discuss how our method promotes farmer empowerment, knowledge exchange, a systemic perspective, and the designing of customized farm management regimes.

Empowering farmers

To be effective, a participatory approach must empower farmers (Cardoso et al., 2001; Dorward et al., 2003; Menconi et al., 2017) without additionally burdening them (i.e., asking them to do researchers' work for free, as discussed in (Hoffmann et al., 2007)). Empowerment results when farmers feel a sense of responsibility for and take ownership of co-designed products (Newig et al., 2008). It is crucial to ensure that farmers have both the power to influence decisions and the technical skills required to carry out those decisions (Reed, 2008).

Our method combines individual interviews and collective workshops in which the only participants are farmers. During method testing, *recipient* farmers “defined [the] objectives and problems” (Cornwall and Jewkes, 1995) by presenting their specific challenges or objectives at the beginning of the process. *Recipient* and *adviser* farmers thus “owned and acted upon” the information exchanged during the process (Cornwall and Jewkes, 1995). *Recipient* farmers adopted some of the proposed changes, and *adviser* farmers were willing to implement some as well. Both groups took ownership of the co-design products.

Exchanging knowledge

Knowledge sharing as well as individual or collective learning are a key part of how participatory approaches can promote exploration and change (Berthet et al., 2015). The transition towards more sustainable agricultural systems has highlighted the importance of local conditions and farmer knowledge (Girard, 2015). Indeed, sustainable agricultural systems should be based on a knowledge of local conditions, which may reflect a greater awareness of ecosystems and context specificities (Röling and Wagemakers, 2000). Farmers draw from a wide range of information—local and empirical knowledge derived from agricultural research as well as from their own experiences (Lefèvre, 2013; Raymond et al., 2010). In other words, they are often carrying out “experiments” as they manage their individual agroecosystems, and their analytical observations generate practical knowledge (Chantre, 2011). Over generations, a pool of traditional knowledge is also acquired, which is refined through adaptation. Some studies have underscored the importance of farmer knowledge (Doré et al., 2011b), arguing that not only does it have practical case-specific value but that it also contributes to scientific knowledge. Consequently, farmers possess valuable information—its exchange can catalyze shifts in agricultural practices (Goulet, 2013; Goulet et al., 2008; Ingram, 2008). In our test groups, we observed that the knowledge shared was very specific and linked to the specific challenge or objective described by each *recipient* farmer. For example, one *adviser* farmer suggested a change that he had recently made on his farm: “*last year, I sowed my own farm-saved seeds of rapeseed, and I didn't see any change in yield. You should try it too!*” Such knowledge was routinely brought up during interviews and workshops. The *recipient* farmers then adapted it to fit with their own objectives. This process can help promote change—

most of the *recipient* farmers incorporated at least some of the suggested changes into their farm management regimes.

A systemic perspective

More and more, researchers are affirming the need to account for variability in farm management regimes during the co-design process (Bellon et al., 2007; Le Gal et al., 2011; Lefèvre et al., 2014; Prost et al., 2017). In this study, the way in which farmers examined and selected re-design elements during the interviews made it clear that it is important to consider management at the farm scale if agricultural practices are to be successfully changed. For example, *recipient* farmer E did not take the recommendation that he use mechanical weed control in one of his cropping systems (CS1); he felt it did not fit with his farm management regime because of his orchard crops (CS3) (Table 3).

Indeed, in the literature, studies focused on improving groundwater quality largely examine (i) cropping systems (Barataud et al., 2016; Hellec et al., 2013; Ravier et al., 2015b) and (ii) combinations of land use at the catchment scale (Allain, 2013; Barataud et al., 2014a; Chantre et al., 2016; De Girolamo and Lo Porto, 2012; Gisclard et al., 2015). These studies propose that groundwater quality issues can be dealt with by increasing the use of biodiversity-enhancing techniques such as planting cover crops or diversifying rotations. However, a major constraint in their implementation is the time and equipment required (Casagrande et al., 2017). Indeed, farmers often fail to adopt more sustainable agricultural practices because they lack the proper resources and/or the practices are a poor fit (Dorward et al., 2003). Consequently, we wished to develop a participatory approach that employed a systemic perspective. We found that farmers were already thinking at the farm scale when they suggested certain changes. Indeed, during the first collective workshop, some *adviser* farmers made suggestions that clearly took the current management regime into account, such as saving alfalfa seeds from cropping system CS3 (Table 4.2) to intercrop alfalfa with rapeseed in cropping system CS2.

This systemic perspective guided our choice of artefact—we generated farm depictions that listed available equipment and pointed out any interdependency between farm cropping systems. We tried to portray the *recipient* farmers' management regimes as realistically as possible so as to increase farmer trust in the process (Barnaud et al., 2013). However, because the artefact was created using data collected by the facilitator and not via direct collaboration with the *recipient* farmers, the representations may have been biased (Pahl-Wostl and Hare, 2004). We observed that conducting interviews with *recipient* farmers before the first collective workshop was essential in allowing *recipient* farmers to take ownership of this artefact. Our results show that the facilitator played a key role in promoting ownership by remarking on the redesigned aspects of the farm management regime and pointed out the resource implications

Finally, by discussing the results of the management modification analyses, *recipient* farmers and facilitators could evaluate the risks and/or benefits associated with certain re-design element in terms of farm performance (agricultural, economic, and social indicators) and groundwater quality. We found that groundwater quality was always improved by the redesign farm management. This conclusion was based on the TFI_{ma}, nitrogen balance values and the scientific literature.

However, our indicators give only information trends on the impact on groundwater quality pressure that can be discussed as groundwater quality may vary in a more complex manner depending on the local

factors that affect leaching. Evaluation of environmental effects of farmer practices would be better at field scale, allowing expression impacts both per unit surface and product (van der Werf and Petit, 2002). For economic evaluation at farm scale, it was interesting to have a global indicator of how management modifications affect total cost and net margin—for example, such an indicator revealed the full expense involved in adding a new crop to a cropping system. Likewise, for social performance at farm scale was useful to assess how such modifications shift distributions of working hours over the year can reveal important facets of trade-offs among farming activities. Likewise, assessing change in working time through a year can reveal competition among farming activities. However, it is essential to keep track of results at crop level to be able to explain the origin of economic and working time variation, a point underscored by farmers during the second collective workshop (step 4).

Designing customized farm management regimes

Here, we chose to eschew the “one size fits all” approach used to design the catchment-level action plan to restore groundwater quality (Menard et al., 2014). Our participatory approach proposes to design customized farm management regimes. Our method was tested using two groups of farmers, and we found that it is well adapted to a diversity of farm management regimes and local conditions. The re-design elements included an increased use of legume crops in the rotation and agroforestry system to improve soil quality, the introduction of new crops in the farm management, and spring crops to favorably modify the specific composition of the weed community. By and large, agroecological practices (Wezel et al., 2014) were suggested, and the recommendations were tailored to account for each *recipient* farmer’s challenge or objective and current farm management regime (e.g., crop number, cropping systems, and available equipment). Ultimately, four of the seven focal *recipient* farmers implemented at least some of the proposed changes. In the following section, we discuss how to better encourage farmers to adopt new agricultural practices that will help improve groundwater quality.

To summarize, in our method, farmers were the only stakeholders involved in the co-design process. We can encourage farmers to adopt more sustainable agricultural practices by promoting farmer empowerment, knowledge exchange, a systemic perspective, and the designing of customized farm management regimes.

1.5.2 Keys to success: the facilitator and recipient farmer

During the consultation stage of the collective workshop, the facilitator played an essential role by guiding the discussion between the *recipient* and *adviser* farmers, thus promoting interactions and knowledge exchange. In the case of *recipient* farmer C, the facilitator let the *adviser* farmers ask questions about the current farm management regime and did not refocus the exchange on suggested changes; consequently, there was no consultation stage, just a presentation and a clarification stage (Appendix 1). Additionally, the facilitator is responsible for ensuring that the discussions have a systemic perspective; for instance, the facilitator should ask the *adviser* farmers to describe the equipment and labor required to implement different recommendations. In the case of *recipient* farmer B, the suggestions made during the consultation stage were a poor fit for his farm management regime; consequently, they were not discussed any further.

Moreover, it is important for the *recipient* farmer to be engaged in the process; he or she must have a well-identified, significant challenge or objective. *Witness* farmer D had a major goal, which was revealed during the pre-workshop interviews (Fig. 1: steps 1a and 1c): converting his conventional farm into an organic farm. However, prior to the workshop, he completed a training program focused on this transition. As a result, the consultation stage was of little additional use. The lesson here is that doing consultation with a *recipient* farmer that has no further improvements or questions about his challenge or objectives is useless.

1.5.3 Method limitations and potential improvements

One of the major limitations of the method described here is that it asks for a large investment on the part of *recipient* farmers. Over the course of one year, we interviewed the *recipient* farmers four times, and the farmers participated in at least two half-day workshops; in some cases, the first collective workshop (step 2) was repeated. In other participatory approaches focused on improving groundwater quality, farmers are asked to do one interview, one workshop, then one field visit once a year over a four-year period (Paravano et al., 2016) or to take part in three workshops over a two-year period (Chantre et al., 2016). Our method required the same relative investment as these other co-design approaches but over a shorter time frame. In the case of one of the study groups (A), we witnessed some reluctance on the part of farmers to commit to the process, and we had to proceed using a few highly motivated individuals.

Farmers have the knowledge needed to make the co-design process work. However, when they are the only participants, the knowledge provided may be somewhat too homogeneous to cope well with unpredictable circumstances (Prost et al., 2017). Furthermore, the farmers may not have sole influence over farm management decisions. In the case of *recipient* farmers A and F, certain suggested changes were suited to their management regimes but were ultimately rejected because the farmer's father or technical adviser offered up an opposing opinion after the workshop. It would have been helpful to include the *recipient* farmer's father to the first collective workshop (step 2).

1.6 Conclusion

In France, dealing with non-point pollution stemming from agricultural sources remains a significant challenge. Here, we sought to develop a participatory approach that will have greater success in encouraging farmers to adopt sustainable agricultural practices. Our method exclusively involves farmers to co-design more sustainable management regimes over the course of individual interviews and collective workshops. One of the main principles driving this method is farmer empowerment: if farmers are encouraged to take ownership of redesigned regimes, they should be more likely to implement substantial change. Our approach dramatically contrasts with other participatory approaches focused on improving groundwater quality because we did not invite stakeholders other than farmers to take part in the co-design process; instead, the goal was to foster knowledge exchange among peers.

We tested our method using two groups of farmers from different parts of southeastern France. Our results show that farmers can come up with innovative recommendations on their own. They shared relevant, diverse knowledge, including local knowledge, as they discussed suitable changes that could help their peers address a given challenge or objective. Redesigning farm management regimes is more

ambitious than just adding a cover crop to a rotation (Paravano et al., 2016); it is less ambitious, however, than converting a conventional farm to an organic farm (Chantre et al., 2014). Finally, our results suggest that this method could improve groundwater quality even though groundwater concerns were a constraint rather than an objective during the co-design process. This participatory approach could also be employed in regions with environmental challenges other than groundwater quality (e.g., groundwater quantity, erosion) since the greater goal is to encourage more sustainable farming practices (e.g., conservation tillage).

1.7 Acknowledgment

We would like to thank the French Rhone - Mediterranean and Corsica Water Agency for funding the research project underlying this paper. We thank Jessica Pearce for her help in English correction. Special thanks are due to the 7 *recipient* farmers and the 13 *adviser* farmers for their collaboration and their friendliness.

1.8 Appendix 1

Table 4. 4 : Stages in the first collective workshop (*stages taking place in small groups)

Stages (minutes')	Tools	Objectives
Icebreaker (10') <i>Farmers mark their farm location on the map while having coffee</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Maps and pins • Board 	<ul style="list-style-type: none"> • Allow farmers to get acquainted • Allow farmers to compare farm geographical locations
Introduction (20') <i>Facilitator describes how the workshop will proceed</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Board • Cards on which each step is written • Clocks 	<ul style="list-style-type: none"> • Present workshop steps to farmers • Clarify workshop goals • Establish ground rules
Presentations* (20') <i>Recipient farmers present their farms (e.g., cropping systems, available equipment) in small groups</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Farm depictions • Voice recorder 	<ul style="list-style-type: none"> • Provide an overview of the <i>recipient</i> farmer's management regime • Describe the specific challenge/objective
Clarification* (10') <i>Adviser farmers ask questions</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Farm depictions • Black pens 	<ul style="list-style-type: none"> • Clarify points either not addressed by the <i>recipient</i> farmer or not included in the depiction • Confirm the challenge/ objective to be discussed
Consultation* (60') <i>Adviser farmers discuss challenges/objectives and potential changes</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Farm depictions • Green pens 	<ul style="list-style-type: none"> • Discuss <i>recipient</i> farmers' challenges/objectives • Examine all cropping systems and propose changes • Share practical and scientific knowledge
Synthesis (30') <i>Recipient farmers rapidly present their farm management regimes and proposed changes to the full group</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Farm depictions • Green pens 	<ul style="list-style-type: none"> • Share specific suggestions • <i>Recipient</i> farmers pre-select suggestions
Feedback (10') <i>Farmers share thoughts on workshop</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Board • Post-it notes 	<ul style="list-style-type: none"> • Farmers evaluate workshop utility • Collect immediate feedback

Table 4. 5 : Comparison of the values of the agricultural, economic, social, and groundwater quality indicators for the current and redesigned farm management regimes for the four *recipient* farmers that retained re-design elements

<i>Recipient farmer</i>	A		E		F		G	
	Original	Modified	Original	Modified	Original	Modified	Original	Modified
Surface area <i>Ha</i>	270	270	140	140	69	69	125	125
Total cost <i>€/ha</i>	812	790	889	1304	757	784	1935	1948
Net margin <i>€/ha</i>	1414	1404	748	1072	840	845	1513	1527
TFI_{ma}	4.87	4.4	1.56	1.56	7	6.65	1.91	1.6
Nitrogen balance <i>uN/ha</i>	36	33	38	41	9	10	30	26
Soil OMC (I_{MO})	2.9	3.1	7.02	6.5	4	4.3	8.8	9.7
Working hours <i>hour/ha</i>	13.9	14.2	15.8	21.9	24	25	28.5	29

Les cinq étapes du processus participatif ont donc permis de faire émerger **des scénarios sur-mesure à l'échelle de l'exploitation agricole et directement applicables** par les agriculteurs *témoins* [*recipient farmer*] et *conseillers* [*adviser farmer*]. La réalisation de cette méthodologie sur Val de Durance et Plaine des Chères a duré respectivement 1 an et 6 mois. Les scénarios présentent une combinaison de propositions de changement qui peut aller d'un simple réajustement d'une pratique agricole (*e.g.* désherbage mécanique) à un changement du système agricole (*e.g.* agroforesterie). Chaque proposition a été évalué et permet d'identifier des **leviers cohérents avec les objectifs des agriculteurs témoins** et qui permettent de protéger la qualité des eaux souterraines. La suite de cet article présente en détail la méthode d'évaluation utilisée et les résultats individuels de chaque changement proposé et associé aux agriculteurs *témoin*.

2. LES RECOMMANDATIONS CO-CONÇUS POUR REpondre AUX OBJECTIFS DES AGRICULTEURS ET DIMINUER LA PRESSION POLLUANTE SUR LES EAUX SOUTERRAINES

2.1 Retour sur l'évaluation *ex ante* à l'échelle de l'exploitation agricole : objectifs visés et indicateurs retenus

Dans ce travail de thèse, une première évaluation *ex ante* est développée, avant la mise en place d'expérimentations par les *témoins* qui pourront être discutées à l'issue de la thèse. Cette évaluation consiste à apprécier *a priori*, les effets induits lié à l'insertion d'une ou des proposition(s) de changement dans l'exploitation agricole du *témoin*. Pour répondre à cet objectif, l'écart entre le fonctionnement d'exploitation agricole actuel du *témoin*, le 'scénario initial', et celui après insertion d'un ou des propositions de changement, sous conditions optimales, le 'scénario final' sera évalué. Les « conditions optimales » supposent une réalisation du changement proposé sans échec, discutée lors de l'atelier de co-conception. Par exemple, on estimera les impacts de la recommandation '*couvert inter-rang sur lavandin*' sans prendre en compte le potentiel envahissement du couvert sur les rangs de lavandin et donc sur le rendement final.

Cette évaluation se fait à l'échelle de l'exploitation agricole, ce qui signifie que l'on tient compte de **l'interdépendance des systèmes de culture**, de la **disponibilité des ressources** matérielles et humaines et de l'environnement socio-économique de l'exploitation. Par exemple, pour évaluer l'impact du changement d'une culture pure de colza vers du colza associé à la luzerne ; on prendra en compte que les semences de luzerne proviennent de la récolte de la luzerne cultivée sur un autre système de culture (*e.i.* le coût des semences de luzerne sera nul et la quantité vendue sera diminuée). De même, il s'agit de vérifier la **cohérence stratégique** de ces propositions avec les objectifs de l'agriculteur ; étape majeure du processus de conception et diffusion de scénarios co-conçus (Meynard and Savini, 2003). Une première évaluation qualitative (étape 3a, cf. §1.3.2) a permis de présélectionner les propositions de changements cohérents avec le fonctionnement de l'exploitation agricole *témoin*. Par la suite, **l'évaluation quantitative de la cohérence stratégique** avec les objectifs des agriculteurs (étape 3b, cf. §1.3.2) a pour enjeu de favoriser **l'appropriation** par les agriculteurs *témoins* et *conseillers* en donnant à voir les effets des scénarios qui sont ainsi anticipés et intégrés à l'échelle de l'exploitation agricole.

L'évaluation est aussi un outil au service des acteurs territoriaux et des politiques publiques (Capitaine et al., 2009) permettant d'assurer que les moyens engagés sont assortis de résultats potentiels. L'estimation de l'impact des scénarios sur la pression employée sur la qualité des eaux souterraines répond à cet objectif. Cette méthode d'évaluation est donc mise au point pour que les **acteurs de l'eau** (animateur de captage, maître d'ouvrage, techniciens agricoles) s'emparent de son utilisation par la suite.

Il existe un large panel de méthode d'évaluation, de l'utilisation d'indicateurs, au modèle opérationnel (*e.g.* INDIGO, MASC et DAEG) (Comte et al., 2006; Girardin and Bockstaller, 2002) ou de simulation (*e.g.* STICS, Co-click'eau, SWAT) (Comte et al., 2006; De Girolamo and Lo Porto, 2012; Gisclard et al., 2015; Jeuffroy et al., 2008a) jusqu'aux mesures de terrain (*e.g.* lysimètre) (Deneufbourg et al., 2010b; Fonder et

al., 2010). Dans notre cas, **la méthode des indicateurs** semble être la plus simple à mettre en œuvre (Bockstaller et al., 2008). « Les indicateurs fournissent des informations au sujet d'un système complexe en vue de faciliter sa compréhension [...] aux utilisateurs de sorte qu'ils puissent prendre des décisions appropriées qui mènent à la réalisation des objectifs » (Mitchell et al., 1995).

Il s'agit dans notre méthode, d'évaluer la **cohérence des scénarios avec les objectifs des agriculteurs**. Il est donc pertinent de choisir un jeu d'indicateurs adapté à notre étude plutôt que d'utiliser une méthode existante (Delmotte et al., 2016; Dorward et al., 2003; Sterk et al., 2007). L'identification des indicateurs se fait via une « négociation » entre les acteurs concernés par ces scénarios et les chercheurs ou ingénieurs conduisant cette évaluation (Doré et al., 2006) car elle nécessite « l'élaboration d'un cadre interprétatif qui organise les variables et les indicateurs et qui n'est pas isolable de son contexte » (Mancebo, 2006).

La **méthode d'évaluation** est caractérisée de **multicritère**, car elle permet d'évaluer des solutions présentant des objectifs contradictoires (implanter un couvert pour améliorer la fertilité du sol v.s. diminution des charges). Pour la construire, nous avons en tête qu'il faut éviter (i) un trop grand nombre d'indicateurs à calculer avec des données limitées qui peut entraîner des risques de simplification abusive et (ii) l'agrégation directe (par somme) d'indicateurs du fait de leur différence de nature et d'unité de mesure (Loyce and Wery, 2006). La construction des indicateurs est issue d'une démarche descendante qui permet de traduire le ou les enjeu(x) de départ en objectifs principaux, eux-mêmes décomposés en objectifs spécifiques puis en sous-objectifs (Girardin et al., 2005). Ces sous-objectifs sont ensuite traduits en actions caractérisées, elles-mêmes, par une ou des variables. En positionnant ces variables par rapport à une référence, elles prennent sens et deviennent des indicateurs (Girardin et al., 2005). Dans notre cas, **les valeurs de références proviennent de la situation actuelle de l'exploitation agricole**, le scénario initial (cf. Annexe 7). À travers des enquêtes auprès des acteurs institutionnels de l'eau et des agriculteurs (étape 0, cf. chapitre 4 : §1.3.2), nous avons identifié les grands objectifs et sous-objectifs qu'ils suivent. Ils peuvent se classer en fonction des performances agronomiques, économiques, sociales et environnementales en ciblant la protection de la qualité des eaux souterraines qui sont présentés par la suite.

2.1.1 Indicateurs liés aux performances agronomiques

En ce qui concerne la **performance agronomique**, on a pu distinguer deux objectifs exprimés par les agriculteurs : « améliorer ou préserver la fertilité des sols » et « maintenir le niveau de production ». Pour évaluer la fertilité des sols, l'évolution du **taux de matière organique** dans le sol est une variable de base (Boiffin et al., 1986) et l'estimer semble pertinent. Nous avons choisi pour cela, l'indicateur INDIGO (I_{MO}) qui évalue l'impact des pratiques culturales (succession, travail du sol, gestion des résidus, amendements organiques) sur la teneur en humus (Bockstaller and Girardin, 2003).

Cet indicateur se calcule à l'échelle de la parcelle. Pour l'exploitation, l'indicateur est obtenu par une moyenne pondérée des valeurs parcellaires au prorata de la surface de chaque parcelle. Cet indicateur résulte du rapport entre les apports nécessaires (A_R) pour maintenir le sol à long terme à une teneur d'équilibre qui soit satisfaisante et les apports en MO pour les quatre dernières cultures (A_X). Ainsi, estimer le pourcentage d'écart entre le scénario initial et final, se fait à l'aide de la formule suivante :

$$\Delta I_{MO} = \frac{(7 \frac{A_R}{A_X})^{final} - (7 \frac{A_R}{A_X})^{initial}}{(7 \frac{A_R}{A_X})^{initial}} \times 100$$

Pour les valeurs prises par les variables A_X et A_R , on utilisera les références agro-environnementales établies dans le modèle de calcul INDIGO (Bockstaller and Girardin, 2003) (cf. Annexe 7).

En ce qui concerne l'objectif de « maintenir le niveau de production », un **indicateur de rendement (Y)** est pertinent car reste une variable stratégique exprimée par les agriculteurs.

$$\Delta Y = \frac{Y^{final} - Y^{initial}}{Y^{initial}} \times 100$$

Les rendements des cultures du scénario initial ont été renseignés par les agriculteurs *témoin* lors de l'entretien (étape 1a, cf. §1.3.2), préalable à l'atelier de co-conception. Les rendements des nouvelles cultures du *scénario final* par rapport au scénario initial ont été estimés grâce à la moyenne régionale ou locale (cf. Annexe 7). L'impact sur les rendements des cultures du scénario initial après insertion d'une proposition de changement ont été estimés grâce à la littérature scientifique.

2.1.2 Indicateurs liés aux performances économiques

L'enjeu de performance économique se définit par un **objectif d'autonomie financière** qui se décline en sous-objectif « ne pas impacter les marges directes ». Nous avons donc choisi d'estimer les charges totales (C) de l'exploitation et sur la marge directe annuelle totale (MD). L'indicateur **charges totales** comprend les charges opérationnelles (CO) et les charges de mécanisation et de main d'œuvre (CMMO). Ces indicateurs s'évaluent à l'échelle de l'exploitation agricole, obtenu par une moyenne pondérée des valeurs parcellaires au prorata de la surface de chaque parcelle.

$$\Delta C = \frac{(CO + CMMO)^{final} - (CO + CMMO)^{initial}}{(CO + CMMO)^{initial}} \times 100$$

$$\Delta MD = \frac{(Y^{final} \times \text{Prix de vente} - C^{final}) - (Y^{initial} \times \text{Prix de vente} - C^{initial})}{(Y^{initial} \times \text{Prix de vente} - C^{initial})} \times 100$$

Les charges opérationnelles correspondent aux coûts des interventions culturales ; du prix de la semence et des intrants, fertilisants et pesticides. Ces prix ont été renseignés par enquête auprès des techniciens des coopératives agricoles locales des deux cas d'étude car ils peuvent varier fortement. Pour estimer les charges de mécanisation et de main d'œuvre, on utilisera respectivement les références établies dans le modèle CRITER (Reau and Fortino, 2010) et les données d'enquêtes auprès des agriculteurs (cf. Annexe 7). Enfin, pour la marge directe, le prix de vente ou d'achat des cultures est renseigné par enquête auprès des techniciens de coopératives ou des semenciers s'il s'agit de culture de semence ou par références nationales/mondiales.

2.1.3 Indicateurs liés aux performances sociales

L'enjeu de la performance sociale se définit par un objectif d'**optimisation du temps de travail** qui se décline en sous-objectifs poursuivis par les agriculteurs que sont la « diminution du temps de travail » et « une meilleure répartition du temps de travail sur l'année ». Pour le premier sous-objectif, l'indicateur du nombre d'heures travaillées par hectare et par an sera calculé.

$$\Delta WH = \frac{WH^{final} - WH^{initial}}{WH^{initial}} \times 100$$

Pour chaque opération culturale, la durée de réalisation est estimée à partir des données de références du modèle CRITER (Reau and Fortino, 2010).

Pour le deuxième sous-objectif, le calendrier d'organisation du travail est établi pour les scénarios initial et final, qui recensera le nombre d'heures travaillées par quinzaine (cf. Annexe 6). La quinzaine à laquelle sont réalisés les opérations culturales est renseignée par l'agriculteur *témoin*, s'il s'agit du scénario initial, et par une référence locale sur la période optimale de réalisation de la pratique agricole, s'il s'agit du *scénario final* (cf. Annexe 7).

2.1.4 Indicateurs liés à la pression polluante sur la qualité des eaux souterraines

L'objectif de cette étape d'évaluation est d'appréhender l'**évolution de la pression polluante** (nitrates et pesticides) sur la qualité des eaux souterraines après insertion du ou des scénarios dans l'exploitation *témoin*. Les sous-objectifs exprimés par les acteurs de l'eau, liés à l'enjeu du territoire, sont « la diminution des risques de pollution par les pesticides » et « diminution des risques de pollution par les nitrates ».

Il s'agit notamment ici d'évaluer l'écart entre les scénarios initial et final. **Cet écart est indépendant de l'état du système** et donc des indicateurs de sensibilité du milieu qui restent identiques entre ces deux scénarios (*i.e.* vulnérabilité de la nappe souterraine). Il est donc pertinent pour estimer cet écart d'utiliser des **indicateurs liés aux pratiques agricoles**, qui rendent compte de la pression polluante intervenant sur la qualité de l'eau.

Concernant l'objectif de « diminution des risques de pollution par les pesticides », il existe de nombreux indicateurs (cf. Tableau 4.1). Le plus utilisé est l'IFT qui permet de distinguer les traitements herbicides et hors herbicides. Il ne permet pas, pour autant, de prendre en compte les substances actives qui composent les pesticides et qui sont ceux que l'on retrouve dans les eaux souterraines. Il semble que **l'Indice de Fréquence de Traitement à la Substance Active (IFTSA)** est le plus pertinent pour évaluer quantitativement et précisément l'écart de pression sur la qualité des eaux souterraines, entre les deux scénarios (cf. Tableau 4.1). Cet indicateur permet de détailler les différences entre la nature et les concentrations de substances actives contenus dans les produits commerciaux épandus. Cet indicateur calcule le rapport entre la dose appliquée pour chaque substance active contenu dans un produit commercial épandu (QSA) à une dose homologuée de substance active. La valeur d'un système de culture est une moyenne pondérée des valeurs de chaque culture qui le composent au prorata de leur surface. Pour l'exploitation, l'indicateur est obtenu par une moyenne pondérée des valeurs de chaque système de culture au prorata de leur surface.

$$\Delta IFTSA = \frac{\sum \frac{QSA^{final}}{\text{dose homologuée de SA}} - \sum \frac{QSA^{initial}}{\text{dose homologuée de SA}}}{\sum \frac{QSA^{initial}}{\text{dose homologuée de SA}}} \times 100$$

L'IFTSA est estimé par rapport à la quantité de pesticides appliqués et la nature du produit, renseignées par voie d'enquête auprès de l'agriculteur. Les quantités de substances actives contenues dans le produit commercial sont facilement renseignées grâce au site <https://ephy.anses.fr/>. Enfin, pour la dose homologuée de ces substances actives, nous avons utilisé les valeurs publiées dans l'arrêté du 12 septembre 2016 « définissant la méthodologie de calcul et la valeur des doses unités de référence des substances actives phytopharmaceutiques ». Ces valeurs de dose homologuée correspondent à celles calculées en 2015.

Concernant l'objectif de « diminution des risques de pollution par les nitrates », l'indicateur *balance azoté* a été utilisé largement à l'échelle de l'exploitation agricole pour estimer le niveau de pression sur la qualité des eaux souterraines (Foissy et al., 2013; Korsæth and Eltun, 2000). Deux autres indicateurs, INDIGO et MERLIN, ont été développés pour être plus précis, en prenant en compte les caractéristiques du sol mais aussi du climat pour l'indicateur INDIGO (I_N) (cf. Tableau 4.1). L'évaluation, dans notre cas, concerne une différence entre le *scénario initial* et le *scénario final*. L'effet « milieu » est donc nul car les caractéristiques édaphique et climatique sont identiques. Ainsi, l'**indicateur de balance azotée [N]** semble le plus pertinent (cf. Tableau 4.1). Cet indicateur doit être calculé dans un temps long, celui d'une rotation afin de prendre en compte la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique par les légumineuses (Carlsson and Huss-Danell, 2003). L'équation de la balance azotée est issue du rapport importation – exportation (CORPEN, 2006) :

$$\Delta N = \frac{(\sum(Q_F \times N) + N_{fixé} - Y \times N)^{final} - (\sum(Q_F \times N) + N_{fixé} - Y \times N)^{initial}}{(\sum(Q_F \times N) + N_{fixé} - Y \times N)^{initial}} \times 100$$

La quantité de fertilisant (Q_F) et la nature du fertilisant azoté sont des données renseignées par enquête auprès des agriculteurs (cf. Annexe 7). L'indicateur de fixation de l'azote par les légumineuses ($N_{fixé}$) est renseigné par la littérature scientifique ou bien estimé par la formule suivante (Carlsson and Huss-Danell, 2003) :

$$N_{fixé} = Y \times 0,017 - 0,65$$

Pour obtenir ces deux indicateurs à l'échelle de l'exploitation agricole, ils sont calculés par une moyenne pondérée au prorata de la surface des systèmes de culture.

Tableau 4. 1 : Présentation des avantages et inconvénients des indicateurs les plus utilisés pour évaluer la pression sur la qualité des eaux souterraines

Indicateurs	Avantages pour calculer la pression sur la qualité des eaux souterraines	Inconvénients pour calculer la pression sur la qualité des eaux souterraines
Indice de Fréquence de Traitement (Guichard et al., 2010)	Il est très simple à évaluer.	Ne tient pas compte des substances actives contenues dans les produits phytosanitaires et de leur toxicité et écotoxicité.
Quantité de Substance Active (Guichard et al., 2010)	Bon indicateur de pression car les quantités de substances actives des produits phytosanitaires indiquent le niveau de contamination de l'environnement.	Ne prend pas en compte l'évolution des grammages des substances actives qui peuvent être plus faibles. Ne tient pas compte de la toxicité et écotoxicité de la substance active.
Indice de Fréquence de Traitement de la Substance Active (Guichard et al., 2010)	Permet de préciser la différence de pression sur qualité des eaux souterraines lors d'une substitution d'un produit en fonction de la nature et de la quantité de substance active qui le composent	Il n'existe pas de dose « d'homologation » pour les substances actives et doit être évalué. Les valeurs de cet indicateur varient d'une année sur l'autre. Ne tient pas compte de la toxicité et écotoxicité de la substance active.
Balance azotée (CORPEN, 2006)	Permet de révéler un éventuel déséquilibre au niveau de la gestion globale de l'azote à l'échelle de l'exploitation agricole. Ne peut pas faire ressortir les risques sur le court terme	Rend compte des quantités d'azote sous trois formes sans en fournir la répartition : nitrique (lixivable à court terme), organique (éventuellement lixiviable à long terme) et gazeuse.
Azote I _N d'INDIGO (Girardin and Bockstaller, 2002)	Permet d'approfondir l'analyse du rôle des pratiques sur le risque d'émission car prend en compte les caractéristiques du sol et du climat.	Demande une quantité importante de données d'entrée pour évaluer cet indicateur. Le modèle lui est paramétré par les données des régions du grand nord est de la France
Merlin (Aimon-Marié et al., 2001)	Prend en compte les caractéristiques du sol	Demande une quantité importante de données d'entrée pour évaluer cet indicateur Ne prend pas en compte le climat et la minéralisation automnale et le poids donné aux trois indicateurs combiné est fait à dire d'experts.

2.2 Les effets des recommandations sur la pression polluante intervenant sur les eaux souterraines

Les résultats d'évaluation présentés dans l'article montrent les effets de la combinaison des propositions de changement sur la qualité des eaux souterraines. Dans ce paragraphe, il s'agit de compléter cette vision globale en présentant l'évaluation à l'échelle de l'exploitation agricole **de chaque proposition prise individuellement**. Cela permet de comparer les performances agronomiques, économiques, sociales et l'impact sur la pression polluante de chacune des propositions de changement. Ces propositions peuvent correspondre à une **même stratégie** (*i.e.* insertion d'une nouvelle culture dans la rotation dans l'exploitation A et F) mais misent en œuvre dans une **exploitation agricole différente**.

On peut observer que la mise en œuvre des propositions de changement par les agriculteurs *témoins* présente des résultats quantitatifs **cohérents avec la stratégie associée** (cf. Tableau 4.2). L'évaluation de la stratégie de l'allongement de la rotation, mise en place afin de diminuer l'utilisation d'herbicides, montre une **diminution de l'IFTSA** pour les cinq propositions de changements associées à cette stratégie. Cela prend diverses formes : implantation de féverole (*témoin A*) ou de sarrasin (*témoins F et G*) dans une rotation non irriguée, association colza/luzerne (*témoin A*) ou encore interculture de féverole pure (*témoin F*). L'évaluation des deux propositions de changement associées à une stratégie de fertilité des sols présentent des résultats positifs concernant le taux de matière organique. Le couvert gélif en lavandin (*témoin A*) et l'implantation du sarrasin en deuxième culture (*témoin G*) augmente respectivement de **9 et 4% le taux de matière organique par rapport à la situation initiale**. La proposition de faire ses semences de ferme comme moyen de diminuer les charges est cohérente ; le résultat des charges totales diminue de 4% par rapport à l'existant (cf. Tableau 4.2). Enfin, la mise en place d'un système agroforestier permet **d'augmenter potentiellement la marge directe** de l'agriculteur *témoin E* de 30%, principal objectif dans ce projet (cf. Tableau 4.2).

Malgré une cohérence avec la stratégie associée à la proposition, la mise en œuvre de ces propositions peut entraîner **des coûts supplémentaires** qui ont été discuté lors du second atelier (cf. Tableau 4.2). Cela a été mis en regard avec les résultats de la marge directe qui présente parfois une augmentation, ce qui a permis de relativiser les charges impliquées. Parmi ces solutions, celles qui permettent d'augmenter la marge directe de l'exploitation ont été mises en œuvre ou vont l'être à court terme (e.g. implantation du sarrasin en dérobée, *témoins F et G*). Concernant les solutions qui ne le permettent pas (colza associé et couvert), ces propositions de changement seront mises en œuvre à plus long terme, selon ce qu'ont exprimé les agriculteurs *témoin* lors des entretiens post-atelier ou lors de l'atelier 2 (cf. étapes 3a et 4, cf. §1.3.2). Leurs **impacts économiques** peuvent expliquer cette réserve exprimée, de même que **la prise de risque** impliquée :

« Je n'ai pas la semence [pour les couverts sur le plateau] et s'il faut acheter les semences ça vaut pas le coup ! Donc à court terme, c'est sûr que non ! On va tester la féverole car l'idée c'est de semer pour ramasser quelque chose. Puis on me dit ce qu'on veut, mais y'a pas beaucoup de recherche là-dessus. J'aimerais qu'on me fasse une vitrine de couverts sur le plateau [...] Avec Guillaume on a le même semoir donc s'il me dit que ça marche [le colza associé], j'irais plus confiant ! » *Témoin A, entretien post-atelier (étape 3a, cf. §1.3.2).*

Exception faite, le système agroforestier a été mis en œuvre à court terme, malgré un coût important (cf. Tableau 4.2). Les agriculteurs *conseillers* ont permis la **mise en relation avec des acteurs clés** de leur environnement socio-économique pour la réalisation de ce projet (e.g. contacts de pépinières producteurs d'essences d'arbre adaptées au terroir), qui a permis cette mise en œuvre à court terme.

Tableau 4. 2 : Résultat d'évaluation multicritère des propositions de changement associés à l'agriculteur *témoïn* et regroupés en fonction de la stratégie à laquelle ils répondent. Les valeurs qui sont cohérents avec l'objectif sont en vert et ceux qui sont incohérents en rouge. Les valeurs en gras présentent celles qui correspondent à la stratégie exprimée par le *témoïn* ou le conseiller lors de la phase de *consultation*.

<i>Témoïn</i>	Solutions implémentées ou à implémenter car sélectionnées	Stratégie exprimée par le <i>témoïn</i> ou conseiller	Performance économique (€/ha)		Performance agronomique	Performance sociale	Performance environnementale	
			Charges totales	Marges Directes	IMO	Temps de travail (heure/ha/an)	IFTSA	N
			A	Insérer la féverole dans la rotation au sec	Diminuer la pression des adventices sur le blé dur	767 (-5%)	1428 (+1%)	3.1 (+4%)
F	Planter du sarrasin en deuxième culture	Diminuer la pression des adventices sur le blé tendre	780 (+3%)	865 (+3%)	4,4 (+2.4%)	27 (+3%)	6,4 (-8%)	9,1 (0%)
A	Colza associé : Colza/luzerne	Diminuer la pression des adventices sur le colza	812 (0%)	1390 (-2%)	3 (+1%)	14,1 (+1%)	4,8 (-2%)	33,6 (-7%)
F	Planter de la féverole en interculture entre maïs	Diminuer la pression des adventices sur le maïs	772 (+2%)	828 (-2%)	4,6 (+7%)	27 (+3%)	6,8 (-1%)	9 (-1%)
A	Faire du bas-volume	Diminuer les intrants	812 (0%)	1414 (0%)	2,9 (0%)	14 (0%)	4,8 (-2%)	36,1 (0%)
G	Planter du sarrasin en deuxième culture	Améliorer la fertilité du sol	1948 (+0,7%)	1527 (+1%)	9,7 (+9 %)	29 (+1%)	1.6 (-14%)	26 (-15%)
A	Couvert gélif entre rang de lavandin	Améliorer la fertilité du sol	841 (+ 4%)	1382 (-1%)	3.1 (+4%)	14 (0%)	4,6 (-5%)	37.9 (+5%)
E	Planter des espèces rustiques d'arbre dans son système agroforestier pistachier, grenadier, figuier	Faire une agroforesterie extensive, sans intervention chimique mais avec une marge et un débouché sur les produits	1304 (+32 %)	1072 (+30%)	6.5 (-0,5%)	22 (+28%)	1,56 (0%)	41 (+5%)
A	Faires ses semences de fermes de blé dur traitées à la ferme et ses semences de colza non traitées	Diminuer les charges	777 (-4%)	1452 (+3%)	2,9 (0%)	14 (0%)	4,4 (-9%)	36,1 (0%)

Par ailleurs, la mise en œuvre de ces propositions de changement implique majoritairement **une augmentation du temps de travail** qui est parfois en concurrence avec d'autre chantier (*e.g.* récolte de la féverole fin juin, lors de la récolte des lavandins et blé dur, cf. Annexe 6 : Témoin A). Cette augmentation représente 1 à 3% de la situation initiale, excepté pour la mise en place du système agroforestier qui représenterait une augmentation d'environ un tiers du temps de travail total mais étalée sur l'année (cf. Annexe 6). Le critère de « **concurrence avec d'autre chantier** » a été pris en compte pour présélectionner les recommandations cohérentes avant de les évaluer (cf. § 1.5.1). Ces résultats matérialisent quantitativement la cohérence avec la performance sociale des recommandations, mais ne semblent pas être des facteurs limitants dans leur mise en œuvre.

Concernant l'objectif de **diminution de la pression par les pesticides et les nitrates**, huit propositions permettent d'y répondre, avec une diminution de l'IFTSA (%) [-14 ; -1] et de la balance azotée (%) [-15 ; -1] plus ou moins importante selon la surface du ou des système(s) de culture impliquée dans le changement et la situation initiale (cf. Tableau 4.2). Pour une même proposition de changement, « implantation d'un sarrasin dans la rotation », on observe une diminution de 8 et 14% pour respectivement les *témoins* F et G (le témoin F présente une valeur de son IFTSA initial plus élevé lié à son activité en arboriculture).

Seules les recommandations « couvert gélif inter-rang » et « systèmes agroforestiers » augmentent les risques de lixiviation de nitrates liée à une augmentation du bilan azoté de 5% (cf. Tableau 4.2). Dans l'évaluation du couvert gélif, les pratiques de fertilisation sur lavandin ne sont pas impactées, et la fixation symbiotique du couvert explique donc cette augmentation. L'implantation de cette recommandation doit donc s'appliquer avec une diminution de l'apport d'intrant azoté sur lavandin afin de ne pas augmenter la pression polluante sur les eaux souterraines. Dans l'évaluation du système agroforestier, les amendements organiques épandus durant les trois premières années d'installation ont été enregistrées et lissées sur les 10 ans d'installation. Le risque est accru durant ces trois années, mais nulle les années suivantes, avec l'arrêt d'apports d'engrais sur le système agroforestier.

Ces résultats **donnent seulement des tendances sur la pression polluante** des recommandations sans garanti sur leur impact sur la qualité des eaux souterraines. Il est donc intéressant de croiser ces résultats avec ceux de la littérature scientifique qui présente des mesures aux champs pour évaluer l'impact de certaines pratiques, proches des recommandations faites.

L'objectif de ce chapitre était de co-concevoir et évaluer des scénarios en adéquation avec le fonctionnement des exploitations agricoles qui permettent de protéger la qualité des eaux souterraines. Il est à l'interface entre une visée méthodologique et opérationnelle. Le développement d'une méthode participative composée de cinq étapes et qui implique exclusivement la participation des agriculteurs répond à ce premier enjeu. La co-conception de scénarios « sur-mesure » à l'échelle de l'exploitation agricole qui comprend une combinaison de propositions de changements répond à ce deuxième enjeu. En effet, chaque proposition de changement ou sa combinaison est en adéquation avec le fonctionnement de l'exploitation agricole associée et permet de répondre à l'enjeu de protection de la qualité des eaux souterraines.

Par ailleurs, on constate que certaines propositions de changement co-conçues, suivent les mêmes stratégies que les mesures réglementaires étudiées au chapitre précédent. La stratégie de couverture du sol (interculture de féverole pure, couvert gélif inter-rang) est similaire à celle que porte la mesure *Couvert* de la DN. La stratégie de diversification des cultures, portée par l'implantation de féverole ou de sarrasin dérobé, est identique à celle que porte la mesure *Div* de la charte d'Oraison. Les différences sont que les recommandations co-conçues sont écrites « sur mesure » à l'issue d'un processus participatif. De même, leur effet sur le fonctionnement des exploitations et sur la pression polluante est anticipé. Ces différences, par rapport au réglementaire, sont pertinentes pour favoriser le changement des pratiques des agriculteurs.

La portée scientifique et opérationnelle de ces résultats seront discutés par la suite.

Chapitre 5. DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES

1. QUELS APPORTS SCIENTIFIQUES DE LA DEMARCHE DEVELOPEE DANS CETTE THESE ?

1.1 Développement d'un cadre d'analyse à l'échelle de l'exploitation agricole pour répondre aux questions de recherche

L'objectif de la thèse était de développer **une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole** pour étudier les mesures de la politique de l'eau et de concevoir des changements adéquats avec le fonctionnement de l'exploitation agricole. Pour cela, nous nous sommes inspiré du cadre conceptuel qui porte sur **la complémentarité de la structure et de la stratégie** d'une exploitation agricole, proposé par Aubry et Michel-Dounias (2006) (cf. Figure 5.1).

Pour évaluer l'adéquation des mesures issues de la politique de l'eau avec le fonctionnement des exploitations, nous avons étudié la modification structurelle puis stratégique. Il nous a semblé pertinent de les distinguer car l'insertion d'une mesure peut entraîner de **fortes modifications structurelles** au sein de l'exploitation agricole, sans toutefois impliquer de modification stratégique tant qu'elle se place **en cohérence avec les objectifs** que suit l'exploitant agricole. A l'inverse, une mesure peut entraîner une faible modification structurelle, mais au contraire impliquer une modification stratégique importante car elle remet en question les objectifs que vise l'exploitant agricole. Ainsi, il s'agissait dans un premier temps d'étudier **comment** les mesures sont appliquées, en détaillant les impacts sur la structure et leurs effets sur la pression polluante sur les ressources en eau. Dans un deuxième temps, il s'agissait d'analyser **pourquoi** elles sont appliquées de telle ou telle façon, en cherchant à faire le lien avec la stratégie portée par l'agriculteur.

L'analyse réalisée à l'aide de ce cadre conceptuel a mis en évidence que, lorsque les mesures ne sont pas adéquates avec le fonctionnement de l'exploitation, alors elles peuvent être mal ou même non implémentées et abandonnées dès que possible (*e.g.* changement/arrêt de la réglementation). Ces mesures sont donc **peu efficaces à court et long terme** en matière de résultat sur la qualité des eaux souterraines. De même, cette évaluation a permis d'identifier les déterminants qui orientent une mise en œuvre optimale pour diminuer la pression polluante sur les ressources en eau. Orientée sur les déterminants liés au fonctionnement de l'exploitation agricole, une **typologie des exploitations agricoles** en fonction de l'adéquation des mesures avec leur fonctionnement a été établie. Cela a permis de proposer des **recommandations adaptées** à la diversité des exploitations visant une meilleure adéquation des mesures et donc une meilleure efficacité à long terme pour protéger la qualité des eaux souterraines.

Dans un second temps, ce cadre conceptuel a été remobilisé à plusieurs reprises, au cours de la démarche participative développée, pour construire des scénarios à l'échelle de l'exploitation agricole (cf. Figure 5.1). Tout d'abord, il a été utilisé lors de l'atelier 1 inspiré du co-développement. La **structure** de l'exploitation *témoin* a été représentée à travers un **artefact** offrant une représentation globale de l'exploitation (l'assolement, les systèmes de culture et leur interdépendance, les ressources matérielles et l'environnement socio-économique...). La **stratégie** était portée par **l'agriculteur** lui-même, en tant que *témoin*, qui est le fruit de ses convictions, sa famille, sa formation et son environnement socio-

économique. Cette représentation, associée à son usage par l'agriculteur lui-même, a permis de concevoir une **combinaison de systèmes de culture**, définie comme un ensemble cohérent de systèmes de culture, en rapport avec les objectifs fixés par l'agriculteur et qui varie en fonction de (i) la diversité des sols rencontrée, (ii) du morcellement du parcellaire et (iii) des ressources disponibles (matérielles et humains) et (iv) de son environnement socio-économique (Le Bail et al., 2006). Enfin, ce cadre conceptuel a été utilisé pour évaluer **l'adéquation des scénarios** issus de l'atelier 1 avec le fonctionnement des exploitations agricoles des agriculteurs *témoin*. Cette étape a permis de sélectionner, parmi les propositions faites lors de l'atelier, celles qui seront évaluées *ex ante* et éventuellement insérées dans l'exploitation agricole.

Le **cadre conceptuel** qui combine la structure et la stratégie d'une exploitation, a donc été pertinent dans ce travail car nous avons pu répondre à nos trois sous-questions de recherche en le mobilisant à chaque étape (cf. Figure 5.1). Cette thèse a permis d'alimenter les travaux sur **l'interdépendance des systèmes de culture**, définie par Papy (2001) comme « les relations et ajustements entre systèmes de culture à l'échelle de l'exploitation agricole et d'organisations plus englobantes ». En s'appuyant sur ce concept, nous avons créé des outils (cadre conceptuel et artefact) qui permettent de le mobiliser et de développer une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole pour restaurer la qualité des eaux souterraines.

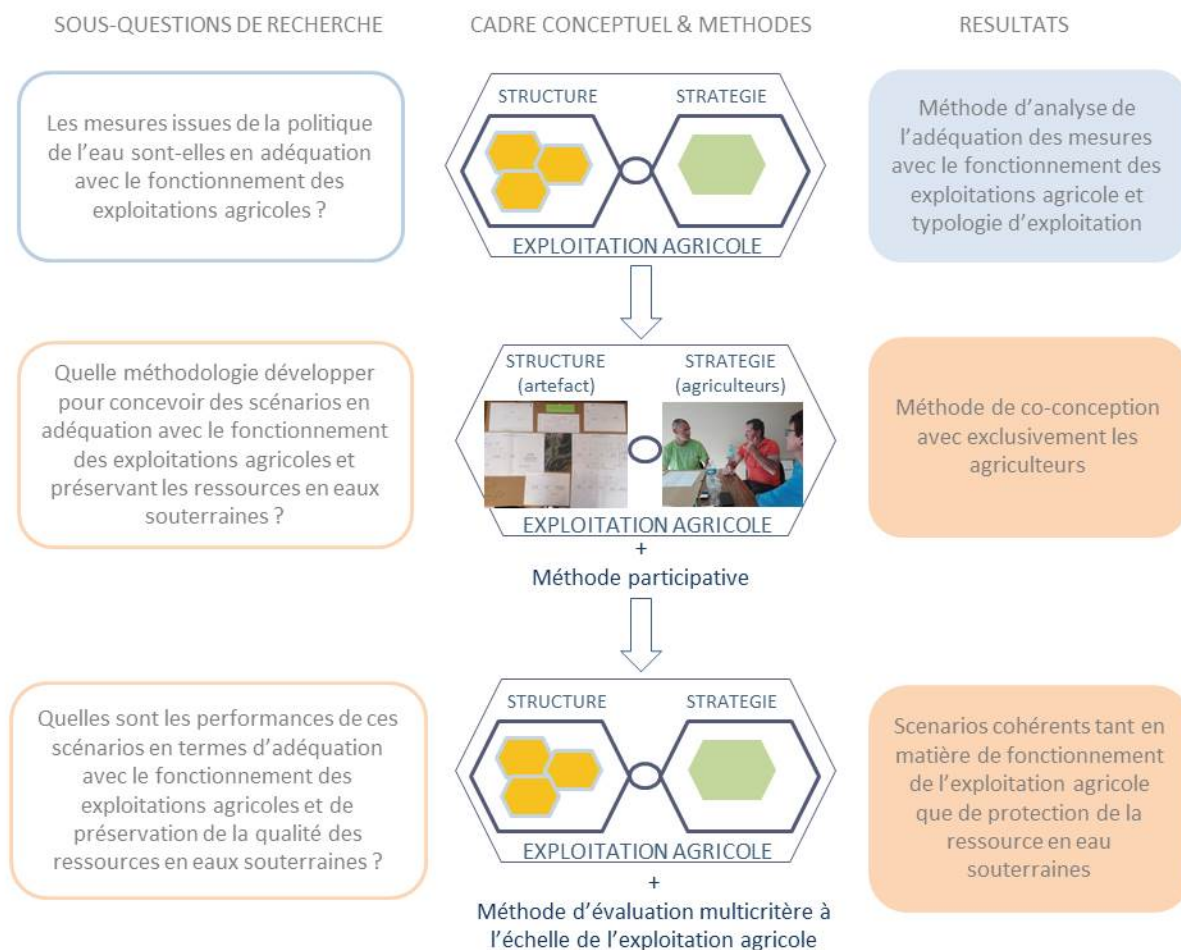


Figure 5. 1 : Schéma qui présente les trois sous-questions de recherche associés au cadre conceptuel et méthodes utilisés pour arriver aux résultats de la thèse

1.2 Développement d'une démarche de co-conception avec et par les agriculteurs pour favoriser le changement

Pour évaluer la démarche participative développée en chapitre 4, nous faisons une distinction **entre le processus de conception et les résultats**, qui sont dans notre cas les scénarios produits. Deux cadres d'analyse différents sont utilisés dans les paragraphes suivants pour les évaluer.

1.2.1 *Évaluation de la démarche participative pour protéger la qualité des eaux souterraines*

Pour évaluer le processus et son contexte *en amont* de la démarche, nous nous sommes inspirés du cadre théorique construit par Hassenforder (2015) pour évaluer les **effets institutionnels** (les règles, normes, procédures) et **organisationnels** sur un processus de planification participatif. Nous avons décliné ce cadre pour notre étude en identifiant les différentes variables à suivre (cf. Tableau 5.1). Ce protocole d'évaluation du processus s'effectue en trois temps (i) *en amont* du processus participatif, (ii) *chemin-faisant*, durant les ateliers, et (iii) *en aval* du processus (Hassenforder et al., 2015). Pour cela, nous procéderons à l'évaluation (i) des variables qui caractérisent le **contexte**, les objectifs et les attentes, (ii) des **interactions entre agriculteurs** pendant les ateliers, et (iii) des **impacts à court terme** via une feuille d'évaluation à remplir par les agriculteurs en début et fin d'atelier¹⁶, la retranscription des ateliers et les interviews post-atelier avec les agriculteurs *témoins*.

On observe une différence de contexte entre les deux études de cas, due à un contraste entre la **diversité des acteurs socio-économiques et professionnels** et leur rôle dans l'accompagnement des agriculteurs (cf. Tableau 5.1).

La chambre d'agriculture du Rhône est peu présente sur la Plaine de Chères, tandis que celle d'Oraison organise des journées de formations et d'informations sur les sujets portant sur la protection de la ressource en eau. De plus, Arvalis-Institut technique du végétal, a une parcelle expérimentale chez un des agriculteurs de l'AAC d'Oraison, sur l'agriculture de conservation, et Agribio04 organise des journées réunissant agriculteurs et acteurs de recherche via un projet européen sur les "engrais verts en conditions méditerranéennes sans herbicides". Cette **diversité d'acteurs**, et les **dispositifs collectifs** qu'ils mettent en place pour accompagner les agriculteurs, permettent de créer un contexte **dynamique** orienté vers des questions de changement de pratiques. **Ce contexte a facilité** notre démarche participative. En effet, la familiarité des agriculteurs avec les ateliers participatifs et leur dynamique face au changement de leurs pratiques, alimentée par les acteurs territoriaux, a permis de mobiliser plus facilement un grand nombre d'agriculteurs (jusqu'à 11 pour un atelier en Val de Durance), contrairement à la Plaine des Chères (seulement 6). **L'homogénéité des acteurs socio-économiques** en Plaine des Chères (cf. Tableau 5.1), ne permet pas de créer une diversité d'expertise agronomique locale, et oriente plutôt vers une dynamique et **un accompagnement individuel**. La proximité géographique des agriculteurs, implique qu'ils se connaissent tous, mais il n'existe pas sur ce territoire un dispositif qui crée une dynamique collective. Ces agriculteurs ont peu ou pas assisté à des démarches participatives. Ce contexte a limité leur mobilisation dans notre démarche.

¹⁶ En début d'atelier, les agriculteurs écrivent sur leurs attentes vis-à-vis de l'atelier. En fin d'atelier, ils les notent en fonction de l'atteinte de ces attentes de [1 'pas atteint' à 5 'totalement atteint'].

Tableau 5. 1 : Liste des variables pour évaluer l'effet institutionnel et organisationnel de la démarche participative et de son contexte

	Val de Durance	Plaine des Chères
CONTEXTE		
Contexte relationnel/organisationnel entre agriculteurs	Ce sont des agriculteurs qui sont dispersés sur la zone Val de Durance. Ils appartiennent à un groupe DEPHY depuis 3 ans et ont un objectif commun « protéger et améliorer les sols » malgré un système et des stratégies différentes	Ce sont des agriculteurs voisins qui se voient quotidiennement sur leurs parcelles et ont une CUMA en commun. Ils se croisent aux réunions d'information sur diverse sujets (e.g. PAEC, DN...).
Discours sociétal : ce que les agriculteurs entendent à propos des questions environnementales et de la participation	Ils sont informés par la chambre 04 des réglementations liées à la protection de l'environnement et au changement du contenu de la PAC	L'animatrice des captages organise des réunions d'information sur l'AAC avec certains des agriculteurs élus.
Familiarité avec les outils d'animation	Ils assistent le plus souvent à des réunions d'animation organisée par un animateur d'agribio04. Ils sont familiarisés avec certains outils et méthodes d'animation	Ils ont peu ou pas assisté à des réunions qui empruntent des outils d'animation et à des démarches participatives.
Contexte institutionnel	Certains agriculteurs ont été ou sont soumis à la Directive Nitrates, d'autres ne connaissent pas la réglementation.	Tous les agriculteurs connaissent la Directive Nitrates qu'ils appliquent pour ceux qui cultivent sur Quincieux et Ambérieux depuis 1997.
Contexte socio-économique	Deux coopératives et des semenciers sont présents sur le territoire créant une diversité d'acteurs économiques.	Une coopérative est omniprésente avec des techniciens associés aux 13 des 14 agriculteurs enquêtés sur la Plaine de Chères.
PROCESSUS DE CONCEPTION PARTICIPATIVE		
Accès à l'information et à l'expertise	Arvalis travaille avec les agriculteurs locaux sur l'agriculture de conservation et informe les agriculteurs des résultats. La chambre d'agriculture organise par ailleurs des formations sur divers sujets (ex. traitement bas-volume, le logiciel //mesparcelles...).	L'information et expertise sont majoritairement données par les techniciens de la coopérative qui conseillent sur les traitements à faire en grandes cultures.
Légitimité/crédibilité	Co-animation avec l'animatrice (CA 04) du réseau DEPHY qui donne une légitimité pour organiser une démarche participative	Entretiens préalables avec les 14 agriculteurs sur l'étude de la DN et rattachement de la doctorante à l'ISARA Lyon (connu dans la région) a permis d'avoir une légitimité pour organiser une démarche participative.
Date/Moment d'implication des différents acteurs	Cf. Figure 5. 3	CF. Figure 5.4
Équité d'expression	Certains agriculteurs <i>conseillers</i> étaient plus présents en temps de paroles et force de proposition que d'autres. Le rôle du facilitateur est de laisser la parole à tous, malgré cela, une hétérogénéité s'est établie entre les <i>conseillers</i> .	Tous les agriculteurs <i>conseillers</i> étaient force de propositions. Ce groupe présentait une homogénéité dans le temps de parole et des changements proposés.
Répétition du processus	Cf. Figure 5. 3	CF. Figure 5.4

Par ailleurs, la variété d'acteurs territoriaux sur Val de Durance crée une multitude de flux d'informations transmis à tout ou partie des agriculteurs présents sur le territoire. Cette diversité peut expliquer la variété des **connaissances scientifiques, exploratoires et empiriques** acquises par les agriculteurs et donc la diversité des propositions de changements (en nombre et caractéristiques) faites par les agriculteurs *conseillers* aux agriculteurs *témoins* (cf. Tableau 5.1). Les **connaissances empiriques acquises** provenaient des expérimentations éprouvées par les agriculteurs suite à des recommandations (ou pas) des différents acteurs territoriaux.

Au contraire, sur la Plaine des Chères, les agriculteurs ayant les **mêmes sources d'informations** liés à un acteur commun, la coopérative, présentent une relative homogénéité des connaissances scientifiques, qui s'est traduit dans les propositions moins diverses faites aux *témoins* (cf. Tableau 5.1) (e.g. implantation du sarrasin pour les deux témoins). Ce contexte présente donc une limite pour des propositions de changement diversifiées auprès des *témoins*. Cependant, il existe sur ce territoire **des dynamiques individuelles**. Certains agriculteurs ont créé des partenariats avec des acteurs de développement et de recherche extérieurs au territoire de la Plaine des Chères tels que L'Association de Coordination Technique Agricole (ACTA) ou Le Groupement d'Étude et de Développement agricole de l'Ozon (GEDA de l'Ozon). Ces agriculteurs ont permis une diversification des propositions de changement grâce aux connaissances empiriques issues des expérimentations éprouvées.



Figure 5. 2 : Photographie d'un groupe d'agriculteurs au cours de l'atelier 1bis. On observe l'agriculteur *témoin* (de dos), deux des trois agriculteurs *conseillers* (à gauche) et la facilitatrice (de dos) avec le plateau au milieu de la table qui présente l'exploitation agricole du témoin.

La **dimension temporelle** (durée et rythme) de la démarche participative, et l'articulation entre les travaux de collecte et de traitement de données sont représentées sous forme de chronogrammes (Figures 5.3 et 5.4). On peut noter une **évolution et adaptation de la méthodologie** de la démarche participative au fur et à mesure de son application. La représentation de l'exploitation agricole du *témoin* (*artefact*) a évolué suite aux expériences des ateliers 1 (cf. Figure 5.2). Un calendrier des cultures présentes dans l'exploitation *témoin* a été rajouté puis retiré car non utilisé par les agriculteurs lors de la phase de *consultation*, de même pour les caractéristiques de l'amont et de l'aval (e.g. achat des semences, ventes des produits finis). Des flèches ont été rajoutées et gardées sur l'artefact car matérialisent les interdépendances entre systèmes de culture, ce qui permet de faire le lien entre les

différentes ressources utilisées (cf. Figure 5.4). En parallèle de cette adaptation des outils, les **pas de temps entre les ateliers** se sont notamment **raccourcis** entre le terrain Val de Durance et Plaine des Chères du fait d'un gain de compétences pour traiter les données. L'évaluation a été plus longue sur le terrain Val de Durance liée à une pluralité d'acteurs socio-économiques et à une première prise en main de la méthodologie d'évaluation. Ainsi, il est nécessaire de compter six mois pour appliquer l'ensemble de la démarche afin de **maintenir la mobilisation des agriculteurs**, en utilisant au mieux les périodes « creuses » des agriculteurs (cf. Figure 5.4).

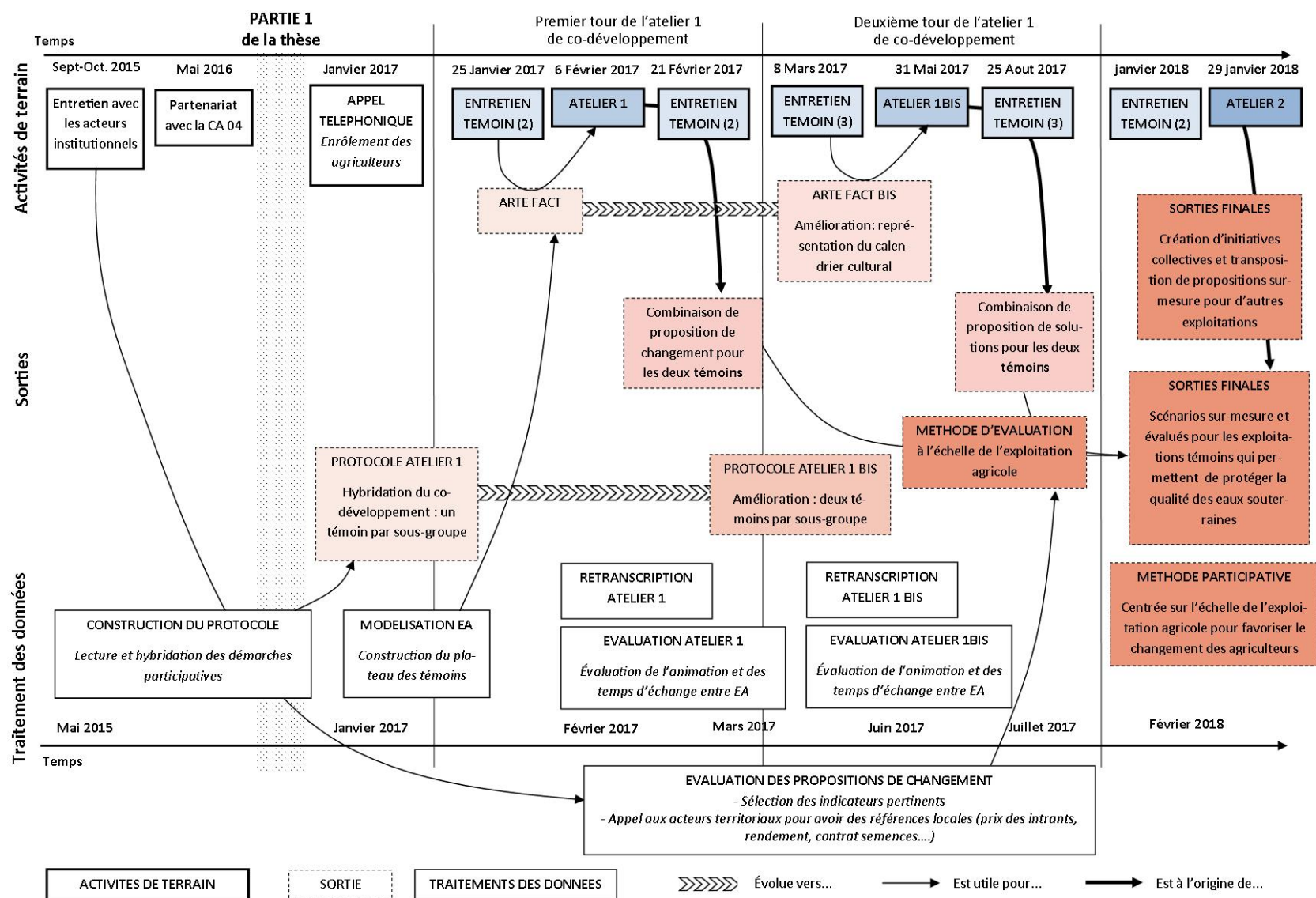


Figure 5. 3: Présentation des étapes clés de la démarche participative sur le terrain de Val de Durance. Il y a eu deux tours de la phase de co-développement (étapes 1, 2, cf. chapitre 4 § 1.3.2) et les outils et méthodes ont évolué au cours de l'application de la démarche participative.

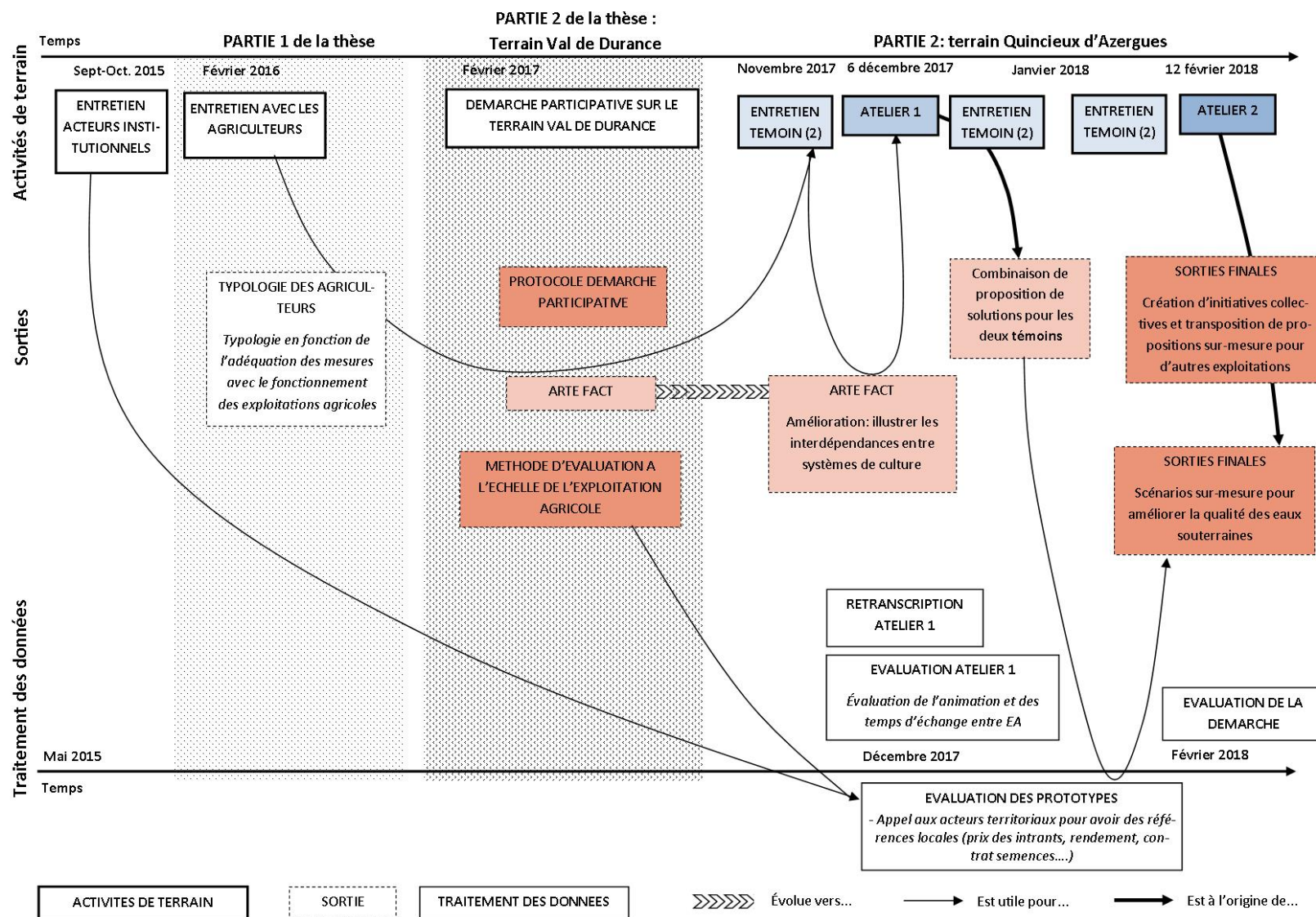


Figure 5. 4: Présentation des étapes clés de la démarche participative sur le terrain Plaine des Chères. Cette application de la méthode participative vient après une première expérience sur le terrain de Val de Durance.

1.2.2 Évaluation des scénarios

Pour évaluer la qualité des scénarios co-conçus, nous nous sommes inspirés des quatre critères définis par Alcamo et Henrichs (2008): (1) leur **pertinence** par rapport aux questions scientifiques en recherche agronomique ; (2) leur **crédibilité** (transparence et rigueur des hypothèses pour l'évaluation *ex ante*, crédibilité des résultats de l'évaluation) ; (3) leur **créativité** (remise en cause des systèmes agricoles existants) et (4) leur **légitimité** (acceptation par les agriculteurs).

Au regard de ces critères, les scénarios co-conçus ont montré leur **pertinence** pour les questions scientifiques, notamment sur la question d'échelle à laquelle appréhender la protection de la qualité des eaux souterraines. Les scénarios jusque-là conçus pour protéger la qualité des eaux souterraines ont porté sur les systèmes de culture ou sur le territoire à enjeu eau. Des scénarios qui portent explicitement sur l'exploitation agricole ont été conçus pour d'autres enjeux, comme l'enjeu de ruissellement érosif (Souchère et al., 2010). Ces travaux de thèse ont donc permis de concevoir des scénarios à l'échelle de l'exploitation agricole, unité de gestion décisionnelle dans le changement de pratiques, pour appréhender la protection de la qualité des eaux souterraines. La **crédibilité** des scénarios évalués s'est révélée positive lors des entretiens avec les agriculteurs *témoin* (étape 3c), et notamment lors de la présentation de ces résultats devant les autres agriculteurs (étape 4). En effet, lors de l'atelier 2, peu de discussions ont été orientées sur les résultats chiffrés, acceptés par la plupart des agriculteurs. Les discussions se sont centrées sur la mise en œuvre et les impacts *ex post* ou *ex ante* des propositions de changement dans l'exploitation. Les scénarios co-conçus sont plus ou moins **créatifs, i.e. en rupture avec le système actuel** et impliquent des modifications structurelles à différentes échelles (I à IV). Si les propositions, impliquant une substitution entre désherbage chimique et désherbage mécanique, n'impactent que les pratiques (niveau II), les propositions d'implantation d'une nouvelle culture dans une rotation (les plus courantes) impactent le système de culture (niveau III). De plus, le scénario de développement d'un système agroforestier reste le scénario le plus *en rupture* car implique le plus de changements à des niveaux structurels considérables (IV). Cette créativité est, il faut le rappeler, initiée par les agriculteurs *témoins* eux-mêmes qui portent des projets ou objectifs innovants. Enfin, ces scénarios présentent également une certaine **légitimité** du fait de leur **acceptation** par les agriculteurs. En effet, nous avons montré que la plupart des scénarios sont en adéquation avec le fonctionnement de l'exploitation du *témoin* et ont été ou vont être mis en œuvre par les agriculteurs *témoins* et certains *conseillers* (cf. chapitre 4 § 1.6).

Le processus participatif mis en place sur ces deux territoires a permis aux agriculteurs témoins et conseillers de s'approprier les recommandations et changer, en conséquence, vers des systèmes plus respectueux de la qualité des eaux souterraines. Les propositions de changement étaient majoritairement liées aux informations et connaissances empiriques associées aux expérimentations individuelles des agriculteurs. Du fait d'une première expérience locale de ces propositions, la prise de risque dans son application diminue, selon les agriculteurs favorisant le changement.

L'application de cette méthodologie sur Val de Durance et Plaine des Chères a duré respectivement 1 an et 6 mois. Le gain en compétences et l'appropriation de la méthode a permis la diminution de la durée, intéressante pour garder une dynamique de groupe entre les agriculteurs.

1.3 Retour sur l'outil d'évaluation des scénarios

L'évaluation des scénarios est une évaluation *ex ante* qui implique de choisir des indicateurs et les calculer avec des hypothèses et des simplifications en fonction des données disponibles (Jeuffroy et al., 2008b; Sadok et al., 2009). Dans notre cas, les propositions faites par les *conseillers* et potentiellement appliquées par les *témoins* sont, par hypothèse, optimales. Dans le calcul des indicateurs, les risques ne sont pas pris en compte (*e.g.* dans le cas d'une luzerne associée à un colza, on n'envisage pas que la luzerne prenne le dessus sur le colza, avec une perte de rendement). Par ailleurs, les données d'entrée pour calculer les indicateurs sont associées à une année précise, pour cette étude : 2017. Les résultats sont donc une représentation de la réalité (l'exploitation agricole initiale) à un temps donné.

L'objectif cette étape d'évaluation est d'estimer les impacts potentiels de la mise en œuvre d'une ou des propositions de changement dans une exploitation agricole identifiée, celle des *témoins*. Cela permet d'anticiper les implications que leur insertion engendre à l'échelle de l'exploitation agricole et sur la pression polluante intervenant sur la qualité des eaux souterraines. Les hypothèses et simplification pour calculer les indicateurs sont donc en cohérence avec l'objectif de la démarche.

Pour traiter des questions de la protection de la qualité des eaux souterraines vis-à-vis des pesticides et nitrates, nous avons choisi respectivement l'indicateur IFTSA et la *balance azotée* (cf. chapitre 4 §2.1.4). Ces indicateurs peuvent être classés **comme indicateurs de moyens** qui sont le plus souvent utilisés du fait de leur facilité d'application, à l'inverse des indicateurs de résultats qui mesureraient directement les quantités de nitrates et pesticides dans les eaux souterraines (van der Werf and Petit, 2002). Cependant, ils ne permettent pas toujours une réelle évaluation de l'impact environnemental des pratiques mises en œuvre mais permettent d'évaluer l'impact sur la pression polluante (Reau et al., 2017).

Parmi les indicateurs de moyens pour évaluer la lixiviation de l'azote et des pesticides, un grand nombre d'indicateurs existent (Bockstaller et al., 2015). Afin d'évaluer la pertinence de ces deux indicateurs, IFTSA et *balance azotée*, nous nous sommes appuyés sur deux études menées par Bockstaller et al. (2017, 2009) sur l'évaluation et la comparaison de la qualité prédictive d'indicateurs pesticides et nitrates traitant des transferts vers des eaux de surface ou souterraines. Concernant l'indicateur IFTSA, un projet EQUIPE a permis de comparer 26 indicateurs pesticides dont l'IFTSA et leur qualité prédictive, en confrontant leurs résultats à ceux des mesures de terrain sur quatre sites différents présentant une diversité de conditions pédoclimatiques. Cette étude montre que, plus les indicateurs prennent en compte les processus en intégrant des variables du milieu, les pratiques agricoles et les propriétés de substances actives, plus la corrélation s'améliore entre les données calculées *ex ante* et les mesures de terrain (Bockstaller et al., 2017). Par ailleurs, évaluer la différence entre le scénario initial et le scénario conçu permet de supprimer l'effet « milieu » qui ne varie pas. L'IFTSA intègre la variation des pratiques et les substances actives utilisées. Néanmoins, elle n'inclut pas les propriétés écotoxicologiques des substances actives. Une déclinaison a été créée, l'IFTSA « potentiel de transfert » qui distingue les substances actives en fonction de leur potentiel de transfert (horizontal et vertical) mais la base de données qui permettrait de le calculer facilement est en cours de développement (Guichard et al., 2010). L'indicateur IFTSA est donc le plus pertinent pour évaluer l'écart entre les scénarios initial et final de la pression polluante en pesticides sur les eaux souterraines.

Concernant l'indicateur *balance azotée*, il est le plus utilisé par les acteurs de développement (Langeveld et al., 2007). Cet indicateur estime, de façon plus ou moins précise, les risques de lixiviation des nitrates liés aux pratiques agricoles, s'il est calculé à l'échelle pluriannuelle (Oenema et al., 2005). Cet indicateur est néanmoins moins précis que ceux s'appuyant sur des mesures de terrain (ex. reliquat azoté).

Par ailleurs, l'échelle à laquelle nous avons calculé ces indicateurs est celle de l'exploitation agricole (cf. chapitre 4, § 2.1). Pourtant, de nombreux auteurs voient les limites de ces analyses à l'échelle de l'exploitation agricole pour comprendre ce qui pose problème à l'échelle du territoire (Gisclard et al., 2015; Jean-Baptiste et al., 2017). Cette échelle ne permet pas de caractériser le territoire dans sa diversité suivant les zones de vulnérabilité de la nappe par rapport aux pressions polluantes et de différencier dans l'espace les actions à engager.

Pour dépasser ces limites, de nombreux modèles ont été développés afin de simuler pour chaque unité agro-pédologique du territoire les flux d'eau, de nitrates et de pesticides (e.g. AgriFlux, STICS) couplés parfois à la simulation des transferts des nitrates et pesticides au sein de la nappe (e.g. SWAT ; MODFLOW-MT3D). Ces modèles sont utilisés par un grand nombre de chercheurs, afin d'évaluer l'impact de différentes stratégies de restauration de la qualité des eaux souterraines à l'échelle du territoire à enjeu eau (Bioteau et al., 2002; Chen et al., 2013; Comte et al., 2006; Queyrel, 2014; Ullrich and Volk, 2009). Ces modèles ne prennent pas en compte l'échelle de gestion (exploitation agricole).

Dans notre travail, l'objectif de l'évaluation était de comparer l'exploitation agricole actuelle et celle après application des recommandations, ce qui élimine l'effet « milieu », calculé par les modèles. Nous n'avons donc pas utilisé de modèles mécanistes qui nécessitent un grand nombre de données, difficilement accessibles. Cette exigence en terme de données d'entrée est notamment incohérente avec l'objectif de transférer facilement cette méthode aux acteurs de l'eau et agricole, sans besoin d'une formation pour se l'approprier.

1.4 Avantages et limites de cette démarche participative centrée sur les agriculteurs

Le principal avantage de cette démarche centrée sur les agriculteurs est la co-conception de scénarios sur-mesure et immédiatement applicables. Ces deux caractéristiques des scénarios conçus sont la conséquence d'une approche centrée exclusivement sur les agriculteurs. Par ailleurs, ces scénarios répondent à l'enjeu de protection de la qualité des eaux souterraines (cf. chapitre 4 § 2.2).

Dans la première partie de la thèse (chapitre 3), la caractérisation des agriculteurs en amont de la démarche participative a permis d'orienter le choix des agriculteurs *témoins* sur la Plaine de Chères (cf. Figure 5.2). En effet, nous avons orienté la sélection des *témoins* parmi les agriculteurs de type II et III (second atelier en parallèle des grandes cultures à caractère chronophage ou objectif principal de réduction des charges). Nous pensions pertinent de concevoir des propositions de changement adéquates avec le fonctionnement de leur exploitation afin de favoriser le changement de leurs pratiques, à l'instar des mesures issues de la politique de l'eau (la difficulté de mobiliser les agriculteurs de type III sera discutée par la suite). *A posteriori*, il aurait été également cohérent de coupler cette caractérisation en lien avec l'adéquation des mesures aux caractéristiques pédoclimatiques de leurs parcelles. Ces

caractéristiques auraient permis de sélectionner les agriculteurs les plus « impactants » en termes de qualité des eaux souterraines.

Elles n'ont pourtant pas été prises en compte car nous avons travaillé spécifiquement à l'échelle de l'exploitation agricole. Cela signifie que le travail de conception a porté sur tous les systèmes de culture d'une exploitation agricole, qui ne se délimite pas au territoire à enjeu eau, sans privilégier les systèmes situés sur ce territoire. Cette approche systémique à l'échelle de l'exploitation fait écho au **territoire de développement**, échelle proposée par Vincent (2016). Elle correspond « aux unités de gestion ou d'action des acteurs impliqués dans les activités de production et valorisation des produits agricoles (agriculteurs, groupes de travail entre pairs, conseillers, opérateur de collecte) » (Vincent, 2016). L'échelle du territoire de développement est à favoriser par rapport à celle du territoire à enjeu eau [privilégié par Chantre et.al (2016) et De Girolamo et.al (2012)] pour mettre en place des projets associant le changement des pratiques agricoles et la protection de la qualité des eaux souterraines (Vincent, 2016). Elle permet, en effet, d'inclure les acteurs socio-économiques associés aux exploitations agricoles, le développement de filière étant vu comme un instrument pour favoriser le changement auprès des agriculteurs. Ce levier n'a pas été favorisé dans notre démarche participative du fait d'une participation exclusive d'agriculteurs, sans la participation d'acteurs socio-économiques. Néanmoins, nous avons pu voir émerger, en Val de Durance, la création d'une filière autour de la pistache. En effet, deux agriculteurs ont implanté des jeunes plants de pistachiers vendus par un des agriculteurs (300 à 150 pistachier) à la suite d'un des ateliers de co-conception. La production de pistaches par trois producteurs dans une région dépourvue de ce type de culture pourrait permettre la création d'une filière autour des pistaches de Haute-Provence. Privilégier donc la participation des agriculteurs n'est donc pas un obstacle à la création d'une nouvelle filière.

Par ailleurs, nous avons orienté la sélection des agriculteurs témoins vers des types II et III pour lesquels les mesures ne sont pas ou peu en adéquation avec le fonctionnement de leur exploitation (cf. Figure 5.2). Or les agriculteurs de type III présentent une faible sensibilité vis-à-vis de la protection de la qualité des eaux souterraines et parfois un atelier chronophage (*e.g.* élevage bovin – 120 UGB). Ces deux caractéristiques peuvent expliquer la difficulté de mobiliser ces agriculteurs dans la démarche participative. En effet, sur la Plaine de Chères, les agriculteurs *témoins* ne sont pas issus du type III car ceux identifiés n'ont pas pu (faute de temps) ou voulu participer à cette démarche. Cette approche présente donc une limite dans la difficulté d'enrôler les agriculteurs qui ne présentent pas de dynamique de changement. Cette limite peut être dépassée par des compétences spécifiques, autour de la concertation et animation, de la part des acteurs qui prennent en main cette méthodologie, et qui peuvent être acquises par l'expérience.

Enfin, cette approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole permet de prendre en compte tous les systèmes de culture de l'exploitation concernée et leurs interdépendances dans la conception de scénario. Néanmoins, les systèmes de culture privilégiés dans la discussion autour des propositions de changement étaient majoritairement ceux des grandes cultures laissant de côté les cultures spécialisées, qui demandent le plus d'intrants, telles que les cultures de semence (ex. témoin A) ou l'arboriculture (ex. témoin F). Cette orientation est due respectivement à une exigence technique liée à un cahier des charges imposé par les semenciers et au manque de connaissance sur ces cultures, de la part des agriculteurs

conseillers. *A posteriori*, il aurait été intéressant pour pallier cette deuxième cause, d'inviter des arboriculteurs de la région qui, par leurs évolutions de pratiques, permettraient d'apporter des connaissances.

A travers l'approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole développée au cours de ces recherches, découle deux résultats majeurs. L'identification des déterminants intrinsèques et exogènes au fonctionnement de l'exploitation agricole, qui permettent d'orienter l'application des mesures issues de la politique de l'eau, de manière optimale pour protéger la qualité des eaux souterraines. La conception de scénarios sur-mesure qui permet de favoriser le changement auprès des agriculteurs.

Nous pouvons qualifier l'approche de la démarche participative développée comme une approche de recherche-action (ou recherche-intervention) dans la mesure où l'objectif est à la fois la résolution d'un problème (qualité des eaux souterraines) dans une situation donnée et la production de connaissances visant à faciliter une dynamique de changement (Ferraton, 2016). Dans la partie suivante, nous discutons de la portée opérationnelle de ce travail de thèse.

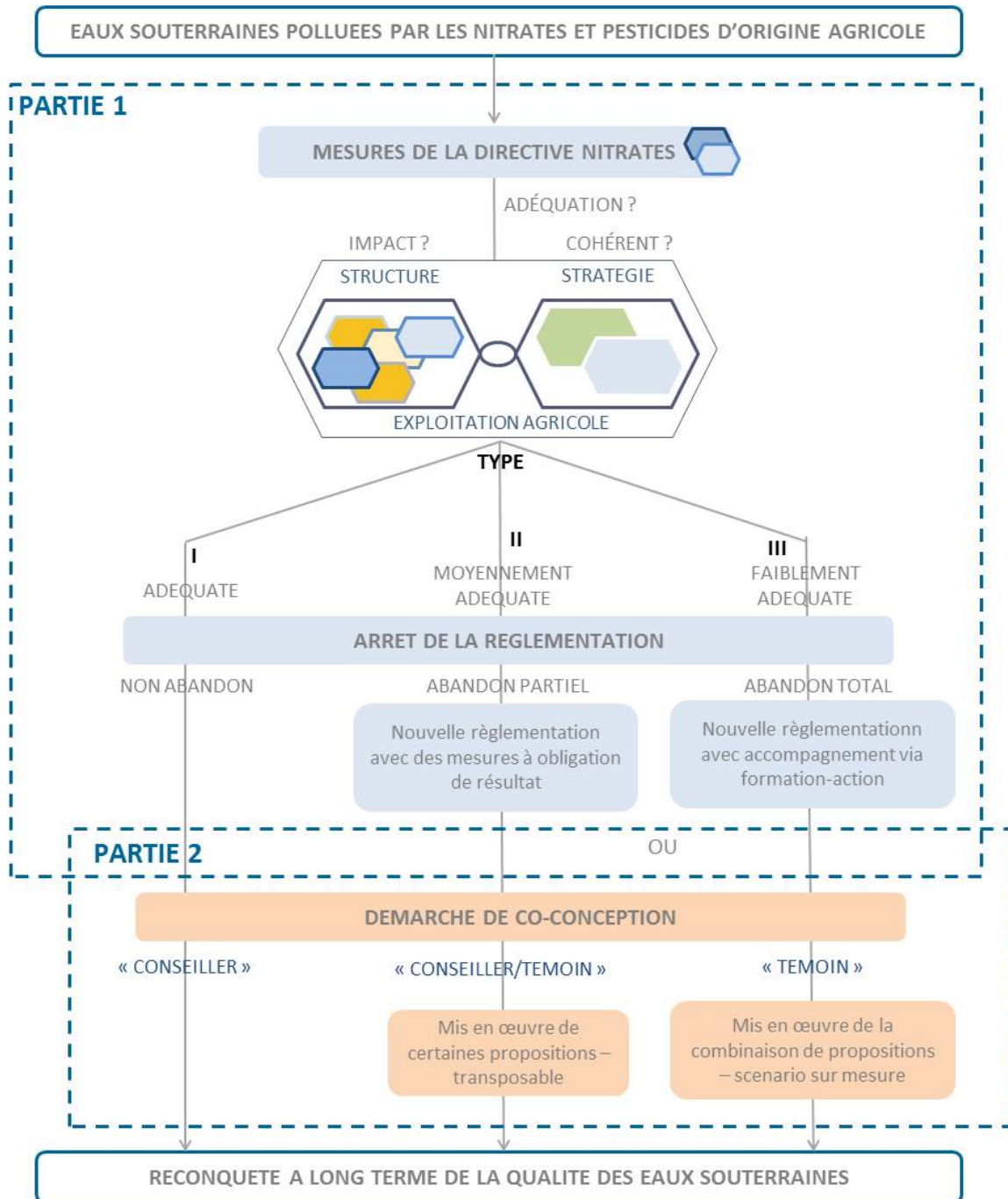


Figure 5. 5: Schéma de la démarche globale de la thèse qui présente les résultats de la partie 1 et la transition vers la partie 2 et sa démarche de co-conception

2. QUELLES PERSPECTIVES OPERATIONNELLES POUR UNE RECONQUETE DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES ?

Dans le but d'adapter les méthodologies développées au cours de cette thèse et d'imaginer des perspectives de leur application, il est important de rappeler les acteurs qui interviennent dans les démarches de protection des ressources. Ils sont divers et se regroupent en plusieurs familles (Menard et al., 2014) :

1. Les **maîtres d'ouvrage**, qui sont en majorité les collectivités, doivent à la fois gérer le déroulement de la démarche et s'assurer de la pertinence des options techniques retenues dans le programme d'actions (PA).
2. Les **animateurs** qui sont impliqués dans tout le processus, notamment le diagnostic territorial des pressions agricoles (DTPA) sur le territoire, mais surtout dans l'écriture et l'animation autour du PA.
3. Les **acteurs institutionnels** (DDT, Agences, DREAL et DRAAF) qui assurent plus facilement un portage des objectifs sur la protection des captages que sur le contenu technique du PA.
4. Les **acteurs professionnels**, en particulier les chambres d'agriculture, qui sont présents dans l'écriture et l'accompagnement des actions agricoles portées par le PA.
5. Les **bureaux d'étude** qui peuvent être appelés soit à délimiter l'AAC, soit à établir le DTPA et définir les mesures du PA.

D'après une enquête menée auprès de ces acteurs (Juan et al., 2018), quatre enjeux opérationnels pour reconquérir la qualité des eaux souterraines, ont été identifiés : le **diagnostic initial**, le **choix des actions**, le **suivi et l'évaluation** du programme, et la **mobilisation des acteurs** (cf. Figure 5.3). Ces auteurs montrent, par ailleurs, une certaine faiblesse numérique des travaux méthodologiques menés pour suivre et évaluer les programmes d'action et pour favoriser l'adhésion des acteurs locaux aux principes et mises en œuvre des programmes d'actions (Juan et al., 2018). Les deux méthodologies développées dans cette thèse peuvent être mobilisées par les acteurs de l'eau pour ces quatre enjeux : une méthodologie de diagnostic de l'application des mesures et une méthodologie de conception de scénarios.

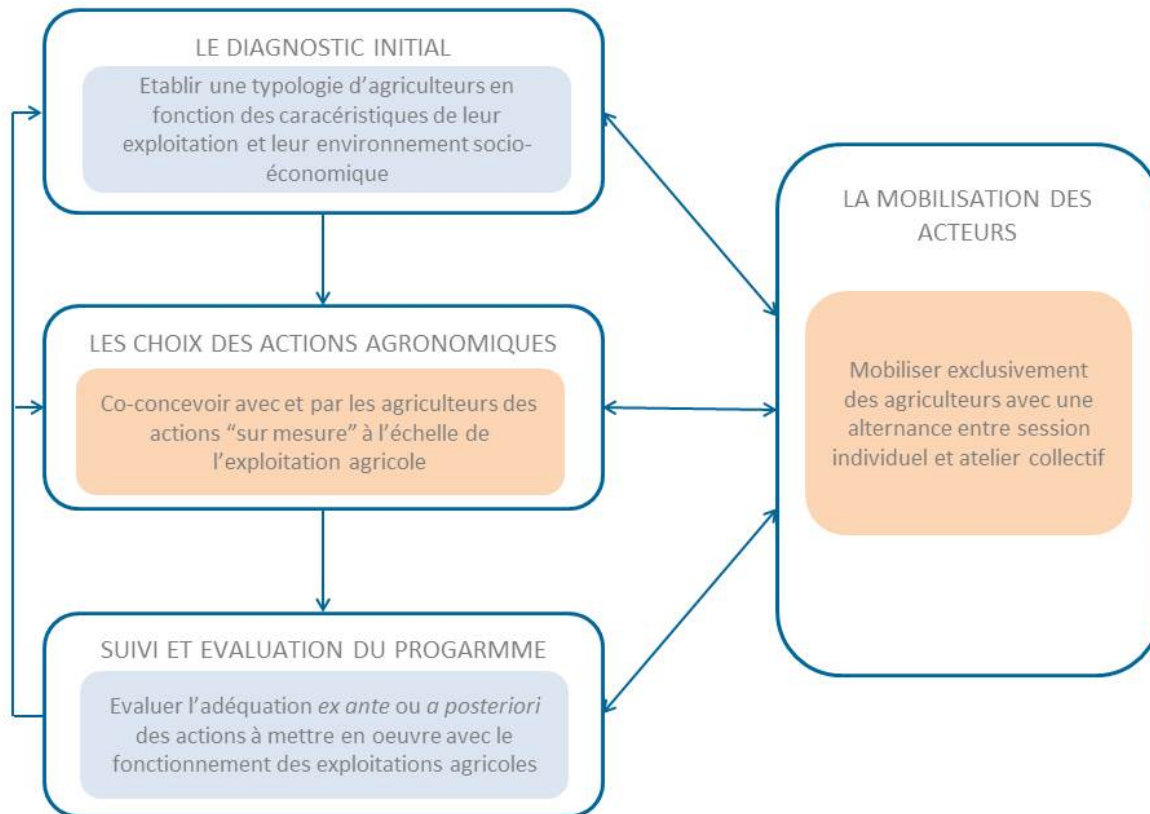


Figure 5. 6 : Les quatre enjeux opérationnels identifiés (Juan et.al, 2018) et le positionnement des méthodologies développées dans la thèse par rapport aux objectifs de ces enjeux (en bleu, la cadre d'analyse développée en chapitre 3 et en orange la méthode de co-conception développée en chapitre 4)

2.1 Premier guide méthodologique

Nous avons rédigé un premier « guide méthodologique d'évaluation de l'adéquation des mesures agro-environnementales avec le fonctionnement des exploitations agricoles : application pour le 5^{ème} programme d'action de la Directive Nitrates » (cf. Annexe 8).

Ce guide peut être mobilisé par les acteurs qui sont en charge du suivi et de l'évaluation du processus et doivent s'assurer de la pertinence des options techniques retenues dans le programme d'actions (maître d'ouvrage, acteurs institutionnels). Il présente une méthodologie d'évaluation *ex ante* ou *a posteriori* de l'adéquation des « actions agronomiques » retenues dans le programme d'action, avec le fonctionnement des exploitations agricoles concernées. Il permet d'évaluer les raisons de l'appropriation ou non des mesures par les agriculteurs du territoire et de proposer une réécriture du programme d'actions en fonction des types d'exploitation révélés à la suite de l'évaluation. Il permet notamment de développer ou d'orienter des outils destinés à chaque type d'exploitation afin de favoriser la dynamique de changements.

Enfin, les résultats présentés dans le guide, peuvent être mobilisé par les acteurs qui établissent le DTPA (animateurs, bureaux d'étude, chambre d'agriculture...) afin de regrouper les agriculteurs selon leur objectif principal (que ce soit économique, agronomique ou social), leur sensibilité vis-à-vis de la protection de l'environnement et la présence ou non d'une activité en parallèle de celles des grandes

cultures et sa priorité vis-à-vis de cette dernière. Regrouper les agriculteurs du territoire permet, par la suite, d'orienter les choix et la conception d'actions par type d'exploitations afin que celles-ci soient en adéquation avec leur fonctionnement et qu'elles soient appliquées de façon pérenne. Le type d'agriculteurs qui présente une seule activité grandes cultures, qui a pour objectif d'augmenter la fertilité des sols et celui de protéger l'environnement, pourra donc bénéficier de mesures co-conçues différentes du type d'agriculteurs qui présente une activité en parallèle chronophage aussi importante que celle de son activité grandes cultures soumis à un objectif de diminution des charges. Cibler les mesures et l'accompagnement du programme d'actions en fonction des différentes caractéristiques des exploitations du territoire est gage d'une meilleure efficacité pour changer les pratiques à long terme, et permettre de reconquérir la qualité des eaux souterraines.

2.2 Deuxième guide méthodologique

Par ailleurs, nous avons rédigé un deuxième guide méthodologique « Guide méthodologique pour concevoir des propositions de changement, avec et par les agriculteurs, adaptées au fonctionnement de leur exploitation : Cas de la reconquête de la qualité des eaux souterraines » (cf. Annexe 9).

Lors du développement de cette méthodologie de co-conception, il nous importait qu'elle soit **transférable aux acteurs en charge de concevoir** et de mettre en œuvre des programmes d'action pour lutter contre la pollution liée aux activités agricoles des eaux souterraines (animateurs de captage, bureaux d'études, acteurs professionnels). Cet objectif découle d'un constat sur les **carences de guides méthodologiques** existants qui permettent à ces acteurs de s'appuyer sur une **méthode simple et facile** à suivre pour mobiliser les agriculteurs et accompagner le changement des pratiques agricoles sur une AAC. Cette observation s'est faite assez tôt durant ma thèse. En effet, j'ai eu l'occasion, au cours de mes premiers mois de thèse, de participer à une formation¹⁷ organisée par la FNAB dispensée par un médiateur environnemental et à des réunions¹⁸ destinées aux animateurs de captage. Au cours de ces journées, de nombreux animateurs de captage ont témoigné des verrouillages au dialogue avec les agriculteurs ou acteurs professionnels (chambre d'agriculture) et de la difficulté de « *développer un plan d'action pertinent* ». Ces animateurs salariés des syndicats de gestion des eaux, des chambres d'agriculture ou des Centres d'Initiatives pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural (CIVAM) avaient des questions de base : « *comment faire pour mobiliser les agriculteurs ?* », « *Comment peut-on avancer plus vite dans l'écriture d'un plan d'action ?* », « *Comment simplement démarrer l'animation pour un projet de territoire ?* » ... Ces questions et témoignages matérialisent les carences d'appui technique pour répondre à ces questions que le guide méthodologique permet, en partie, de combler. Du fait de l'absence d'utilisation d'outils informatiques ou d'animation qui nécessitent une formation comme les outils ECOPHYT'EAU, CO-CLICK'EAU et CoOPLAaGE (cf. Tableau 5.2), elle permet une appropriation et mise en œuvre par le plus grand nombre.

¹⁷ « Pratiquer le dialogue territorial pour éviter les tensions suscitées par les projets liés à l'eau et l'agriculture (zones de captages d'eau potable, bassins versants, etc...) », à Jussieu (75) le 22, 23 et 24 juin 2015

¹⁸ « Journée Animateurs » organisée par l'agence de l'eau RMC, à la Tour du Pin (38), le 9 juillet 2015 et « pratiquer le dialogue territorial pour prévenir les blocages, le cas des projets liés à l'eau et à l'agriculture, journée de partage d'expériences et de pratiques » organisée par la FNAB, à Paris (75), le 24 novembre 2016

Par ailleurs, la sortie de cette méthodologie se rapproche d'une des sorties de la méthode Co-click'eau et de la méthode développée par Reau et al., (2012) (cf. Tableau 5.2). Elles ont été développées pour aider à la conception de plan d'actions efficaces pour protéger la qualité des eaux souterraines sur une AAC. La différence que propose cette méthodologie développée dans ces travaux de thèse, est la conception **d'actions techniques « sur-mesure »** pour les exploitations qui permettent de protéger la qualité des eaux souterraines. Elle répond à un objectif principal ; celui de **favoriser le changement de pratiques** par les agriculteurs afin de répondre à l'enjeu de restauration de la qualité des eaux souterraines.

Tableau 5.2 : Présentation des guides et outils d'animation qui permettent de répondre à l'enjeu de reconquête de la qualité des eaux souterraines.

Méthode et outil d'animation	Objectif
METE'EAU (MÉdiation sur les TÉrritoires à enjeu Eau) (Arrighi and Barataud, 2015) <i>développé par l'INRA</i>	Outil pour faire dialoguer autour de l'eau sous forme de jeu de cartes (format cartes à jouer) pour faciliter la discussion avec les acteurs
ECOPHYT'EAU http://www.agriculture-durable.org/ressources/mission-ecophyteau/ <i>développé par le CIVAM du Haut-Bocage et le Réseau d'Agriculture Durable (RAD)</i>	Outil d'accompagnement qui permet de représenter les systèmes de culture et leurs caractéristiques techniques grâce à un ensemble de cartes et de pions pour améliorer le transfert de connaissances liées à la co-conception de systèmes de culture économes en intrants
CLICK de CO-CLICK'EAU http://coclickeau.webistem.com/bac/ <i>Développé par l'INRA</i>	Outil de simulation en ligne pour la conception de scénarios d'évolution des pratiques agricoles et l'évaluation de leurs effets environnementaux et socio-économiques
RES-EAU-LUTION DIFFUSE (Bourgeois et al., 2015) <i>Développé par LISODE et IRSTEA</i>	Jeu de rôle sur la gestion collective des pollutions diffuses qui met en scène deux types d'alternatives : Changement de pratiques agricoles qui est contraint par la gestion du risque au niveau des exploitations et certaines caractéristiques des filières agro-industrielles Réduction des transferts de substances actives par l'intégration d'une Zone Tampon collective
CAPPWAGG-LAC http://www.particip.fr/test-du-jeu-de-role-cappwag-lac/ <i>En cours de développement dans des travaux de thèse à l'IRSTEA</i>	Jeu de rôle qui vise à confronter les joueurs à des problématiques de partage de l'eau et de lutte contre la pollution diffuse
« l'eau en Têt » à partir de WAT-A-GAME/coOPLAaGE (Abrami et al., 2012) https://sites.google.com/site/watagame2/ <i>Développé par l'IRSTEA et CIRAD</i>	Jeu de rôle à partir d'un kit méthode et outils (briques & logiciel) pour représenter, concevoir, simuler et aider à la gestion de l'eau (quantitatif ou qualitatif) dans les bassins versants avec tous leurs acteurs.
SimPhy (Ayadi et al., 2014) <i>Développé par l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier (IAMM) et IRD</i>	Jeu de rôle qui met en scène des contraintes de réduction d'utilisation de pesticides et de marché afin de définir des stratégies de gestion pour la réduction de produits phytosanitaires
Méthode de co-conception de SdC entre agriculteurs (Reau et al., 2012) <i>Développé par l'INRA</i>	Ateliers menés avec plusieurs outils d'animation et de facilitation pour concevoir des systèmes de culture destinés à inspirer les agriculteurs dans la mise en œuvre et le changement de leurs propres systèmes de culture pour protéger la qualité des eaux souterraines. Elle permet de mettre en œuvre une gestion dynamique de la transition dans l'AAC (avec l'utilisation du tableau de bord).
Méthode de co-conception à l'échelle de l'exploitation agricole entre agriculteurs Issue de mes travaux de thèse (cf. Annexe 9) <i>Développé par l'ISARA-Lyon</i>	Ateliers de co-développement menés avec plusieurs outils d'animation et de facilitation pour concevoir des propositions de changement « sur mesure » aux exploitations agricole afin de favoriser le changement qui répondent à l'objectif de protection de la qualité des eaux souterraines

Du fait d'une participation exclusive des agriculteurs, ce guide ne répond pas à tous les enjeux opérationnels que rencontrent ces animateurs de captage. De nombreux outils d'animation et méthodes ont été développés par ailleurs pour y répondre (cf. Tableau 5.2). L'outil METE'EAU, les jeux de rôles

« rés-eau-lution diffuse », SimPhy, Wat-A-Game et CAPPWAGG-LAC, et la méthode Co-click'eau permettent de mettre en œuvre une concertation et partager des représentations et points de vue différents entre acteurs.

Ce guide méthodologique est donc **complémentaire à ceux existants** pour mobiliser les agriculteurs d'un territoire à enjeu eau. Il est un appui technique et méthodologique pour accompagner les changements des pratiques par les agriculteurs, et peut être **associé aux outils réglementaires et économiques** présentés dans les cas d'étude des « *success story* » (e.g. acquisition foncière, aides incitatives, accompagnement individuel et développement de filière, chapitre 1). Par ailleurs, il peut être utilisé dans une logique **d'aide aux conseillers agricoles** qui font face aujourd'hui à une évolution de leur métier (Cerf et al., 2010). Ces derniers doivent, en effet, travailler avec la diversité des agriculteurs et des trajectoires de changement. L'appréciation de cette diversité ne nécessite pas seulement une simple transposition des modes d'interaction éprouvés, comme les « tours de plaine », mais un conseil « à froid » qui, en grandes cultures, concerne autant des changements de pratiques agricoles que des changements de systèmes de culture (Cerf et al., 2010).

Cette démarche rentre dans le **cadre d'un dispositif collectif**, proposé par les acteurs professionnels agricoles, pour accompagner les agriculteurs vers des changements de pratiques qui peuvent répondre à divers enjeux (problème d'érosion, protection de la biodiversité...).

Le processus proposé a une durée opérationnelle de 6 mois, suffisamment courte pour pouvoir conserver une dynamique dans le groupe d'agriculteurs. L'acteur qui prend en main cette méthodologie aura une connaissance du territoire qui permettra d'être pertinent dans le choix des agriculteurs *témoins* et *conseillers*. En effet, il est intéressant de cibler des agriculteurs *témoins* dont les changements de pratiques ne sont pas favorisés par la politique orientée sur l'enjeu en question et qui peuvent être les plus « impactants » par rapport à l'enjeu concerné (érosion, biodiversité, quantité des eaux souterraines...). Concernant les agriculteurs *conseillers*, ils aient nécessaires qu'ils présentent des connaissances complémentaires pour faire émerger des propositions de changement pertinentes pour répondre aux projets des agriculteurs *témoins* et à l'enjeu du territoire.

Par ailleurs, à la suite du processus participatif, il serait intéressant de revenir après un temps long (plus de 6 mois), afin de laisser le temps aux agriculteurs *témoins* de mettre en œuvre certaines propositions de changement. Cette rencontre permettrait d'analyser les changements réalisés et maintenus ou abandonnés dans l'exploitation du *témoin* concernée, et de **diffuser ces résultats** auprès des autres agriculteurs du territoire. Cela favoriserait la transposition et l'application de ces recommandations auprès des agriculteurs car expérimentées localement et dont les **effets sur le fonctionnement de l'exploitation (calendrier de travail, matériels...) peuvent être appréhendés**. Cette diffusion entre les agriculteurs qui cultivent sur un même territoire à enjeu eau permettrait donc de diminuer, de manière plus efficace et durable, la pression polluante sur la qualité des eaux souterraines (e.g. rompre la monoculture de blé avec l'implantation du sarrasin en Plaine des Chères, faire du colza associé qui permet une diminution de l'application d'herbicides et nitrates en Val de Durance...).

Cette thèse est un projet financé et issu d'une demande de l'agence de l'eau RMC afin « de produire de nouvelles connaissances scientifiques, mais aussi d'éprouver de nouvelles méthodes d'accompagnement des agriculteurs engagés dans un programme d'actions au sein de leur aire d'alimentation (guide méthodologique à usage des gestionnaires de la ressource) ». Ces travaux ont donc permis de répondre à ces objectifs et ont élargi les acteurs cibles pour les méthodes d'accompagnement. En effet, les deux méthodologies développées et éprouvées, en chapitres 3 et 4, permettent d'évaluer des mesures réglementaires qui répondent à des enjeux environnementaux plus larges que celui de protection de la qualité des eaux souterraines et de concevoir avec et par les agriculteurs des propositions de changement cohérentes et qui répondent à ces enjeux.

CONCLUSION

Ces travaux de thèse abordent deux enjeux actuels : celui de **préserver la qualité des eaux souterraines**, et celui de **favoriser l'évolution des pratiques agricoles** par l'agriculteur pour préserver l'environnement.

Le premier enjeu découle du constat d'une pollution des eaux souterraines françaises qui persiste malgré la création d'outils réglementaires depuis bientôt 30 ans. La pollution des eaux souterraines est majoritairement d'origine agricole. Elle provient de la lixiviation des nitrates et des pesticides, qui entraîne ces intrants vers les eaux souterraines, un phénomène multifactoriel et délimité dans l'espace (les limites hydrogéologiques de la nappe). Du fait de **la complexité de ce phénomène**, les solutions pour le limiter sont diverses et parfois sans garantie. Leur réussite dépend du contexte climatique, anthropologique et édaphique.

De nombreuses études ont cherché à résoudre ce problème persistant en concevant des solutions à l'échelle du territoire, grâce à des modèles qui prennent en compte tous ces facteurs. L'échelle du territoire à enjeu eau, AAC et ZVN, semble pertinente pour les appréhender. Seulement, l'objectif qui accompagne la conception des solutions est celui de **leur adoption durable par les agriculteurs**.

Les résultats de ces travaux de recherche montrent que dans les deux cas d'étude, la majorité des agriculteurs a, depuis le retrait de leurs parcelles des zones vulnérables nitrates, abandonné l'application des mesures de la Directive Nitrates. De ce constat, on est en droit de se demander si rendre ces mesures obligatoires à vie sur ces zones sensibles est une option pertinente pour protéger de façon pérenne la qualité des eaux souterraines. Il s'agit dans cette perspective de rentrer dans une logique de « gouvernement de fer » développée par Hobbes (1971) pour remédier à la « tragédie des biens communs » symbolisant la dégradation de l'environnement. Néanmoins, les résultats montrent que ces mesures coercitives peuvent être partiellement efficace pour reconquérir la qualité des eaux souterraines dans la manière dont elles sont appliquées, car peu cohérentes avec le fonctionnement des exploitations agricoles.

Appuyés sur ces résultats, ces travaux de thèse se sont intéressés à l'approche la plus pertinente pour favoriser le changement des pratiques des agriculteurs. De nombreuses études en recherche agronomique se sont intéressées à la dynamique de changement des pratiques agricoles par les agriculteurs, afin de trouver des pistes pour la favoriser. Cela résulte d'une prise de conscience, depuis 40 ans, de l'impact du modèle de l'agriculture intensive sur l'environnement, et donc d'une transformation nécessaire des systèmes agricoles pour limiter ces impacts. Elles montrent que l'adoption des systèmes à bas intrants par les agriculteurs se heurtent à des freins associés au fonctionnement de leur exploitation (ressources matérielles, concurrence temporelle entre chantiers, etc.).

Dans ces travaux, l'approche privilégiée est celle prônée par Elinor Ostrom (1990), qui célèbre la capacité des acteurs locaux à s'organiser et à construire des solutions qui permettent de protéger leur ressource commune. Cette logique est privilégiée par des études en recherche agronomique pour répondre à l'enjeu de protection de la qualité des eaux souterraines. Des démarches participatives ont été développées pour construire et évaluer, à l'échelle d'un territoire ou du système de culture, des scénarios de modification des pratiques agricoles permettant de réduire les pressions liées aux pesticides et aux nitrates. Elles rassemblent agriculteurs, acteurs de l'eau (maître d'ouvrage, agence de l'eau, animateur de

captage) et acteurs professionnels agricoles (élus de la chambre d'agriculture, techniciens agricoles). Les résultats montrent qu'il est important pour un bon déroulement du processus, d'accorder une attention particulière à la présence des agriculteurs présentant des systèmes agricoles divers, afin de produire des scénarios plus variés grâce à leur participation active et motivée.

Nous nous sommes inspirés de ces résultats, et avons développé une démarche participative dont deux principales caractéristiques diffèrent. Il s'agit de n'impliquer que les agriculteurs dans la démarche et de concevoir des scénarios « sur-mesure » à l'échelle de l'exploitation agricole afin de favoriser leur application. Les raisons d'une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole proviennent des résultats des études de la dynamique de changement, qui sont confirmées par les premières conclusions de ces travaux de thèse. Cette démarche a été appliquée sur les deux cas d'étude. Cette participation exclusive des agriculteurs a permis de prendre en compte le fonctionnement de l'exploitation. Lors des ateliers, les agriculteurs ont porté un regard sur l'ensemble de l'exploitation agricole étudiée, afin de faire des propositions de changements pertinents avec son fonctionnement. Ainsi, elle a permis de favoriser la conception de propositions de changement sur mesure et applicables immédiatement par les agriculteurs.

Seulement, une des limites de cette démarche porte sur une exploration parfois insuffisante des solutions pour protéger la qualité des eaux souterraines. Cet objectif dans la conception des scénarios n'a pas été mis en avant comme objectif lors des ateliers, mais envisagé comme une contrainte. La raison est uniquement liée au type d'enjeu, celui de protéger la qualité des eaux souterraines. En effet, il s'agit d'un sujet qui crispe les tensions au sein des agriculteurs qui se sentent montrés du doigt, accusés d'être les pollueurs des nappes phréatiques. Seulement, le fait que cela ne soit pas un objectif dans la conception a probablement contingenté les propositions aux seuls projets des agriculteurs. Cette démarche n'est peut-être pas la plus pertinente pour un enjeu de reconquête de la qualité des eaux souterraines, contrairement à celles qui centrent la conception autour de cet enjeu. En contrepartie, ces propositions de changements ont été appliqués ou vont l'être par tous les agriculteurs qui ont fait l'objet de propositions adéquates par les pairs, et permettent de diminuer la pression polluante sur la qualité des eaux souterraines.

Sur le plan théorique, ces travaux de recherche prolongent les études rurales de gestion. Un cadre d'analyse à l'échelle de l'exploitation a été développé et mobilisé tout au long de cette recherche. Il s'appuie sur une combinaison entre la structure et la stratégie d'une exploitation agricole, et permet d'évaluer l'adéquation d'un scénario avec le fonctionnement d'une exploitation agricole. De même, cette thèse se situe dans le courant général des démarches participatives, de type co-conception. La méthode de conception et d'évaluation des scénarios a été appliquée dans cette étude à la protection de la qualité des eaux souterraines, mais pourrait être utilisée pour d'autres thématiques impliquant des objectifs de changement de pratiques agricoles.

Sur le plan opérationnel, cette thèse apporte deux méthodologies mobilisables par les acteurs intervenant dans les démarches de protection de l'environnement (enjeu qualité, quantité de l'eau, érosion, etc...), pour répondre à différents objectifs opérationnels.

L'une propose cinq étapes, facilement applicables pour évaluer *a posteriori* ou *ex ante* les mesures proposées aux agriculteurs pour répondre à l'enjeu environnemental concerné et leur adéquation avec le fonctionnement des exploitations agricoles présentes sur le territoire. La seconde propose cinq étapes pour co-concevoir, avec et par les agriculteurs, des propositions de changement adaptées à leur fonctionnement, tout en permettant de répondre à la problématique étudiée.

Plus généralement ces travaux de thèse ouvrent des pistes à approfondir face aux enjeux cités. Concernant la restauration de la qualité des eaux souterraines, il aurait été idéal d'expérimenter le dispositif participatif avec d'autres agriculteurs *témoin* sur les mêmes ou autres territoires à enjeu eau. Cette diversité de cas aurait pu confirmer ou infirmer, que ce protocole est pertinent pour l'enjeu de qualité des eaux souterraines.

Par ailleurs, la prise en compte explicite du fonctionnement de l'exploitation agricole consiste à travailler avec l'interdépendance des systèmes de culture et les ressources humaines et matérielles de l'exploitation agricole. Cette approche a montré sa pertinence face à l'objectif de favoriser l'application de nouvelles pratiques agricoles par les agriculteurs. Suivre l'évolution de ces pratiques dans le temps long pour étudier la durabilité de ces changements aurait été essentiel pour appuyer les conclusions de ces travaux.

Nous nous sommes appuyés dans cette thèse sur le cas de l'enjeu de qualité des eaux souterraines et nous avons montré les apports d'une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole au service de la transition agroécologique de l'agriculture. Il serait intéressant de poursuivre et approfondir cette approche pour différents enjeux et contextes. Une nouvelle thèse de recherche, initiée en octobre 2017 en donne la possibilité. Elle s'oriente sur la conception de scénarios à l'échelle de l'exploitation agricole afin de favoriser les changements de pratiques des maraîchers pour gérer la santé des sols.

RÉFÉRENCES.

- Aarts, H.F.M., Habekotté, B., Van Keulen, H., 2000. Nitrogen (N) management in the 'De Marke'dairy farming system. *Nutr. Cycl. Agroecosystems* 56, 231–240.
- Abrami, G., Ferrand, N., Morardet, S., Murgue, C., Popova, A., De Fooij, H., Farolfi, S., Aquae-Gaudi, W., 2012. Wat-A-Game, a toolkit for building role-playing games about integrated water management. IEMSS.
- Aimon-Marié, F., Angevin, F., Guichard, L., 2001. Merlin, une méthode agronomique pour apprécier les risques de pollution diffuse par les nitrates d'origine agricole. *Agrotransfert Lusignan Fr.*
- Alcamo, J., Henrichs, T., 2008. Chapter two towards guidelines for environmental scenario analysis. *Dev. Integr. Environ. Assess.* 2, 13–35.
- Allain, S., 2013. L'agriculture biologique comme bien commun pour protéger la ressource en eau, in: *DinABio 2013. Colloque National Sur Les Recherches En Agriculture Biologique.* p. np.
- Altieri, M., Nicholls, C., 2004. *Biodiversity and pest management in agroecosystems.* CRC Press.
- Altieri, M.A., Toledo, V.M., 2005. Natural resource management among small-scale farmers in semi-arid lands: Building on traditional knowledge and agroecology. *Ann. Arid Zone* 44, 365.
- Anadón, M., 2007. *La recherche participative: multiples regards.* PUQ.
- Andersson, I., Petersson, M., Jarsjö, J., 2012. Impact of the European Water Framework Directive on local-level water management: Case study Oxunda Catchment, Sweden. *Land Use Policy* 29, 73–82.
- Arrighi, A., Barataud, F., 2015. METE'EAU. Un outil de MEdiation TErritoriale au service de la protection de l'eau, in: *Colloque de Fin de Phase 6 Du Programme PIREN-Seine. 2015; Colloque 2015 Du PIREN-Seine, Paris, FRA,, 18-19.*
- Attonaty, J.-M., Chatelin, M.-H., Garcia, F., 1999. Interactive simulation modeling in farm decision-making. *Comput. Electron. Agric.* 22, 157–170.
- Aubertot, J.-N., Barbier, J.M., Carpentier, A., Gril, J.-N., Guichard, L., Lucas, P., Savary, S., Voltz, M., 2007. Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et en limiter les impacts environnementaux. *Expertise scientifique collective Inra-Cemagref (décembre 2005).*
- Aubry, C., 2007. *La gestion technique des exploitations agricoles: composante de la théorie agronomique.* Mém. D'habilitation À Dir. Rech. Inst. Natl. Polytech. Toulouse.
- Aubry, C., Biarnes, A., Maxime, F., Papy, F., Brossier, J., Dent, B., 1998. Modélisation de l'organisation technique de la production dans l'entreprise agricole: la constitution de systèmes de culture du Bassin Parisien.
- Aubry, C., Michel-Dounias, 2006. L'agriculteur acteur et décideur. Systèmes de culture et décisions techniques dans l'exploitation agricole: la constitution de systèmes de culture., in: *L'agronomie Aujourd'hui.* Editions Quae.
- Ayadi, H., Le Bars, M., Le Grusse, P., Mandart, E., Fabre, J., Bouaziz, A., Bord, J.P., 2014. SimPhy: a simulation game to lessen the impact of phytosanitaries on health and the environment—the case of Merja Zerga in Morocco. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 21, 4950–4963.
- Bacqué, M.-H., 2006. Empowerment et politiques urbaines aux Etats-Unis. *Géographie Économie Société* 8, 107–124.
- Barataud, F., 2014. *Accompagner les acteurs dans des démarches de protection de la ressource en eau.*
- Barataud, F., Aubry, C., Wezel, A., Mundler, P., 2014a. Management of drinking water catchment areas in cooperation with agriculture and the specific role of organic farming. Experiences from Germany and France. *Land Use Policy* 36, 585–594.

- Barataud, F., Benoit, M., Beguin, P., Havet, A., Le Bail, M., Martin, P., Mathieu, A., Reau, R., Remy, B., Vial, L., 2014b. Accompagner les acteurs dans des démarches de protection de la ressource en eau. Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques.
- Barataud, F., Reau, R., Hellec, F., 2016. regards croisés sur des démarches de protection de l'eau associant le monde agricole. *Agron. Environ. Sociétés* 6, 115–125.
- Barnaud, C., Le Page, C., Dumrongrojwatthana, P., Trébuil, G., 2013. Spatial representations are not neutral: Lessons from a participatory agent-based modelling process in a land-use conflict. *Environ. Model. Softw.* 45, 150–159.
- Barnes, A.P., Willock, J., Hall, C., Toma, L., 2009. Farmer perspectives and practices regarding water pollution control programmes in Scotland. *Agric. Water Manag.* 96, 1715–1722.
- Barnes, A.P., Willock, J., Toma, L., Hall, C., 2011. Utilising a farmer typology to understand farmer behaviour towards water quality management: Nitrate Vulnerable Zones in Scotland. *J. Environ. Plan. Manag.* 54, 477–494.
- Barreteau, O., Bots, P., Daniell, K., 2010. A framework for clarifying participation in participatory research to prevent its rejection for the wrong reasons. *Ecol. Soc.* 15, 22–p.
- Béguin, P., Cerf, M., 2004. Formes et enjeux de l'analyse de l'activité pour la conception des systèmes de travail. *Activités* 1, 54–71.
- Bélis-Bergouignan, M.-C., Cazals, C., 2006. Démarches environnementales volontaires, conflit d'usage et proximité. Le cas de la viticulture et de l'arboriculture fruitière. *Dév. Durable Territ. Économie Géographie Polit. Droit Sociol.*
- Bell, M.M., Lyon, A., Gratton, C., Jackson, R.D., 2008. COMMENTARY: The productivity of variability: an agroecological hypothesis. *Int. J. Agric. Sustain.* 6, 233–235.
- Bellon, S., Bockstaller, C., Fauriel, J., Geniaux, G., Lamine, C., 2007. To design or to redesign: how can indicators contribute, in: *Farming Systems Design 2007: An International Symposium on Methodologies for Integrated Analysis of Farm Production Systems*. 2007-09-102007-09-12, Catania, ITA. La Goliardica Pavese.
- Bénézit, J.-J., Delcour, D., Rathouis, P., Raymond, M., 2014. Pour une meilleure efficacité et une simplification des dispositions relatives à la protection des captages d'eau potable (Rapport Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt/CGAAER). Ministère des affaires sociales et de la santé/IGAS, Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie/CGEDD. agriculture.gouv.fr/telecharger/58268?token=d8dca90f589183d08afc23e2506bc0df
- Benoît, M., Deffontaines, J.-P., Gras, F., Bienaimé, É., Riela-Cosserat, R., 1997. Agriculture et qualité de l'eau Une approche interdisciplinaire de la pollution par les nitrates d'un bassin d'alimentation. *Cah. Agric.* 6, 97–105.
- Bernet, T., Ortiz, O., Estrada, R.D., Quiroz, R., Swinton, S.M., 2001. Tailoring agricultural extension to different production contexts: a user-friendly farm-household model to improve decision-making for participatory research. *Agric. Syst.* 69, 183–198.
- Berthet, E.T., Barnaud, C., Girard, N., Labatut, J., Martin, G., 2015. How to foster agroecological innovations? A comparison of participatory design methods. *J. Environ. Plan. Manag.* 1–22.
- Bianchi, F.J.J.A., Booij, C.J.H., Tscharnkte, T., 2006. Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: a review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 273, 1715–1727.
- Bioteau, T., Bordenave, P., Laurent, F., Ruelland, D., 2002. Evaluation des risques de pollution diffuse par l'azote d'origine agricole à l'échelle de bassins versants: intérêts d'une approche par modélisation avec SWAT®. *Ingénieries-EAT* p–3.
- Blanchet, A., Gotman, A., 2010. L'entretien: L'enquête et ses méthodes. Paris Armand Colin.

- Bockstaller, C., Feschet, P., Angevin, F., 2015. Issues in evaluating sustainability of farming systems with indicators. *Oilseeds Fats Crops Lipids* 22.
- Bockstaller, C., Galan, M.-B., Capitaine, M., Colomb, B., Mousset, J., Viaux, P., 2008. Comment évaluer la durabilité des systèmes en production végétale. *Systèmes de cultures innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer* 29–51.
- Bockstaller, C., Girardin, P., 2003. Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO. *Rapprt Tech. INRA*.
- Bockstaller, C., Guichard, L., Keichinger, O., Girardin, P., Galan, M.-B., Gaillard, G., 2009. Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems: a review, in: *Sustainable Agriculture*. Springer, pp. 769–784.
- Bockstaller, C., Pierlot, F., Marks-Perreau, J., Réal, B., Constant, T., Lioeddine, A., Carluer, N., Miralles, A., Morin, A., Van Dijk, P., 2017. Evaluation de la qualité prédictive d'indicateurs pesticides de transfert vers les eaux: le projet EQUIPE. *Innov. Agron.* 59, 25–39.
- Boiffin, J., Kelizagbahi, I., Sebillotte, M., 1986. Systèmes de culture et statut organique des sols dans le Noyonnais: application du modèle de Hénin-Dupuis.
- Bonny, B.P., Prasad, R.M., Narayan, S.S., Varughese, M., 2005. Participatory Learning, Experimentation, Action and Dissemination (PLEAD) A Model for Farmer-Participatory Technology Evolution in Agriculture. *Outlook Agric.* 34, 111–115.
- Bosc, C., Doussan, I., 2009. La gestion contractuelle de l'eau avec les agriculteurs est-elle durable? Approche politique et juridique. *Économie Rurale Agric. Aliment. Territ.* 65–80.
- Boulier, F., 2011. Retour d'expérience des opérations de lutte contre la pollution diffuse d'origine agricole (synthèse technique). *AgroParisTech-ENGREF & SAFEGE*.
- Bourgeois, M., Dionnet, M., Rougier, J.-E., Imache, A., Billy, C., Tournebize, J., Bouarfa, S., 2015. Un dialogue territorial innovant pour contribuer à la réduction des pollutions diffuses au niveau d'un territoire, *Abstract. Sci. Eaux Territ. Numéro 17*, 58–61.
- Brosius, J.P., 1997. Endangered forest, endangered people: environmentalist representations of indigenous knowledge. *Hum. Ecol.* 25, 47–69.
- Brun, A., 2003. Aménagement et gestion des eaux en France: l'échec de la politique de l'eau face aux intérêts du monde agricole. *VertigO- Rev. Électronique En Sci. Environ.* 4.
- Bruning-Fann, C.S., Kaneene, J.B., 1993. The effects of nitrate, nitrite and N-nitroso compounds on human health: a review. *Vet. Hum. Toxicol.* 35, 521–538.
- Buckley, C., 2012. Implementation of the EU Nitrates Directive in the Republic of Ireland—A view from the farm. *Ecol. Econ.* 78, 29–36.
- Buysse, J., Van Huylenbroeck, G., Vanslembrouck, I., Vanrolleghem, P., 2005. Simulating the influence of management decisions on the nutrient balance of dairy farms. *Agric. Syst.* 86, 333–348.
- Capitaine, M., David, C., Freycenon, R., 2009. Evaluation et amélioration de la durabilité de l'agriculture biologique: éléments de débats. *Innov. Agron.* 4, 209–215.
- Carberry, P.S., Hochman, Z., McCown, R.L., Dalgliesh, N.P., Foale, M.A., Poulton, P.L., Hargreaves, J.N.G., Hargreaves, D.M.G., Cawthray, S., Hillcoat, N., others, 2002. The FARMSCAPE approach to decision support: farmers', advisers', researchers' monitoring, simulation, communication and performance evaluation. *Agric. Syst.* 74, 141–177.
- Cardoso, I.M., Guijt, I., Franco, F.S., Carvalho, A.F., Neto, P.F., 2001. Continual learning for agroforestry system design: university, NGO and farmer partnership in Minas Gerais, Brazil. *Agric. Syst.* 69, 235–257.
- Carlsson, G., Huss-Danell, K., 2003. Nitrogen fixation in perennial forage legumes in the field. *Plant Soil* 253, 353–372.

- Carruthers, I.D., Stoner, R., 1981. Economic aspects and policy issues in groundwater development. World Bank Washington DC.
- Casagrande, M., 2008. Early assessment of organic winter wheat performances (yield and grain protein content): a combination of regional agronomic diagnosis, modelling with weed indicators and analysing information sampled by farmers to manage their technical practices. (PhD Thesis). AgroParisTech.
- Casagrande, M., Alletto, L., Naudin, C., Lenoir, A., Siah, A., Celette, F., 2017. Enhancing planned and associated biodiversity in French farming systems. *Agron. Sustain. Dev.* 37, 57.
- Catchment Sensitive Farming Evidence Team, 2011. Catchment Sensitive Farming: ECSFDI Phase 1 & 2 Full Evaluation Report, A clear solution for farmers. Environment Agency. <http://publications.naturalengland.org.uk/publication/5329340644458496>
- Cerf, M., Omon, B., Chantre, E., Guillot, M., Le Bail, M., Lamine, C., Olry, P., 2010. Vers des systèmes économes en intrants: quelles trajectoires et quel accompagnement pour les producteurs en grandes cultures. *Innov. Agron.* 8, 105–119.
- Cerf, M., Sebillotte, M., 1997. Approche cognitive des décisions de production dans l'exploitation agricole [Confrontation aux théories de la décision]. *Econ. Rurale* 239, 11–18.
- Chambers, R., 1994. The origins and practice of participatory rural appraisal. *World Dev.* 22, 953–969.
- Chambers, R., Thrupp, L.A., 1994. Farmer first: farmer innovation and agricultural research. KARTHALA Editions.
- Chantre, E., 2011. Apprentissages des agriculteurs vers la réduction d'intrants en grandes cultures: Cas de la Champagne Berrichonne dans les années 1985-2010. (PhD Thesis). AgroParisTech.
- Chantre, E., Guichard, L., Ballot, R., Jacquet, F., Jeuffroy, M.-H., Prigent, C., Barzman, M., 2016. Co-click'eau, a participatory method for land-use scenarios in water catchments. *Land Use Policy* 59, 260–271.
- Chantre, E., Guichard, L., Gisclard, M., Nave, S., Jacquet, F., 2012. Une démarche collective de construction de scénarios prospectifs à l'échelle d'Aires d'Alimentation de Captages pour appuyer l'élaboration de plans d'actions en vue d'améliorer la qualité de l'eau, in: *Symposium PSDR 3*. p. np.
- Chantre, E., Prost, L., Guichard, L., Reau, R., 2014. Re-thinking agricultural practices to improve water quality: two participatory methodologies for collaborative learning, in: *11. European International Farming System Association Symposium*. p. np.
- Chen, Y., Cheng, S.Y., Liu, L., Guo, X.R., Wang, Z., Qin, C.H., Hao, R.X., Lu, J., Gao, J.J., 2013. Assessing the effects of land use changes on non-point source pollution reduction for the Three Gorges Watershed using the SWAT model. *J. Environ. Inform.*
- Chia, E., Brossier, J., Benoit, M., 1992. Recherche-Action: Qualité de l'eau et changements des pratiques Agricoles. *Économie Rurale* 208, 30–36.
- Clavel, L., 2010. Développement d'une méthode de construction et d'évaluation de scénarios d'usages du sol de grands territoires: application à la demande en eau d'irrigation dans le système Neste (PhD Thesis).
- Collombet, R., 2014. Spatialized assessment of environmental impacts of practices on water catchment areas (Rapport de stage). ISARA-Lyon.
- Commissariat général du développement durable, 2016. L'eau et les milieux aquatiques - Chiffres clés. Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer. http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Reperes/2016/reperes-2016-eau-milieux-aquatiques-b.pdf

- Comte, J.-C., Banton, O., Villard, A., Kockmann, F., Creuzot, G., 2006. Évaluation de l'efficacité de différentes stratégies de restauration de la qualité des eaux souterraines par modélisation du transfert des nitrates—Cas des formations. *Ingénieries* 15–28.
- Coquil, X., Blouet, A., Fiorelli, J.L., Bazard, C., Trommenschlager, J.M., 2009. Conception de systèmes laitiers en agriculture biologique: une entrée agronomique. *Prod. Anim.* 22, 221.
- Cornwall, A., Jewkes, R., 1995. What is participatory research? *Soc. Sci. Med.* 41, 1667–1676.
- CORPEN, 2006. Des indicateurs azote pour gérer des actions de maîtrise des pollutions à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et du territoire 112.
- Curry, N., Ingram, J., Kirwan, J., Maye, D., 2012. Knowledge networks for sustainable agriculture in England. *Outlook Agric.* 41, 243–248.
- Darnhofer, I., Fairweather, J., Moller, H., 2010. Assessing a farm's sustainability: insights from resilience thinking. *Int. J. Agric. Sustain.* 8, 186–198.
- De Buck, A.J., Hendrix, E.M., Schoorlemmer, H.B., 1999. Analysing production and environmental risks in arable farming systems: A mathematical approach. *Eur. J. Oper. Res.* 119, 416–426.
- De Girolamo, A.M., Lo Porto, A., 2012. Land use scenario development as a tool for watershed management within the Rio Mannu Basin. *Land Use Policy* 29, 691–701.
- de Sainte Marie, C., 2014. Rethinking agri-environmental schemes. A result-oriented approach to the management of species-rich grasslands in France. *J. Environ. Plan. Manag.* 57, 704–719.
- de Souza, H.N. de, Cardoso, I.M., Mendonça, E. de S., Carvalho, A.F., Oliveira, G.B. de, Gjorup, D.F., Bonfim, V.R., 2012. Learning by doing: a participatory methodology for systematization of experiments with agroforestry systems, with an example of its application. *Agrofor. Syst.* 85, 247–262.
- Defoer, T., De Groote, H., Hilhorst, T., Kante, S., Budelman, A., 1998. Participatory action research and quantitative analysis for nutrient management in southern Mali: A fruitful marriage? *Agric. Ecosyst. Environ.* 71, 215–228.
- Deike, S., Pallutt, B., Melander, B., Strassemer, J., Christen, O., 2008. Long-term productivity and environmental effects of arable farming as affected by crop rotation, soil tillage intensity and strategy of pesticide use: A case-study of two long-term field experiments in Germany and Denmark. *Eur. J. Agron.* 29, 191–199.
- Delmotte, S., Barbier, J.-M., Mouret, J.-C., Le Page, C., Wery, J., Chauvelon, P., Sandoz, A., Ridaura, S.L., 2016. Participatory integrated assessment of scenarios for organic farming at different scales in Camargue, France. *Agric. Syst.* 143, 147–158.
- Demsetz, H., 1967. Toward a theory of property rights. *Am. Econ. Rev.* 347–359.
- Deneufbourg, M., Vandenberghe, C., Heens, B., Bernaerdt, R., Fonder, N., Xanthoulis, D., Marcoen, J.M., 2010a. Adaptation des pratiques agricoles en fonction des exigences de la Directive Nitrates et validation des résultats via le suivi lysimétrique de la lixiviation de l'azote nitrique/Adaptation of agricultural practices according to requirements of the Nitrates Directive and validation through nitrates leaching follow up thanks to lysimeters. *Biotechnol. Agron. Société Environ.* 14, 113.
- Deneufbourg, M., Vandenberghe, C., Heens, B., Bernaerdt, R., Fonder, N., Xanthoulis, D., Marcoen, J.M., 2010b. Adaptation of agricultural practices according to requirements of the Nitrates Directive and validation through nitrates leaching follow up thanks to lysimeters. *Biotechnol. Agron. Société Environ.* 14, 113.
- Dogliotti, S., García, M.C., Peluffo, S., Dieste, J.P., Pedemonte, A.J., Bacigalupe, G.F., Scarlato, M., Alliaume, F., Alvarez, J., Chiappe, M., others, 2014. Co-innovation of family farm systems: A systems approach to sustainable agriculture. *Agric. Syst.* 126, 76–86.

- Dogliotti, S., Van Ittersum, M.K., Rossing, W.A.H., 2005. A method for exploring sustainable development options at farm scale: a case study for vegetable farms in South Uruguay. *Agric. Syst.* 86, 29–51.
- Doré, T., Le Bail, M., Martin, P., Ney, B., Roger-Estrade, J., 2006. *L'agronomie aujourd'hui*. Editions Quae.
- Doré, T., Makowski, D., Malézieux, E., Munier-Jolain, N., Tchamitchian, M., Tiftonell, P., 2011a. Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: revisiting methods, concepts and knowledge. *Eur. J. Agron.* 34, 197–210.
- Dorward, P., Galpin, M., Shepherd, D., 2003. Participatory farm management methods for assessing the suitability of potential innovations. A case study on green manuring options for tomato producers in Ghana. *Agric. Syst.* 75, 97–117.
- Drinkwater, L.E., Wagoner, P., Sarrantonio, M., 1998. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses. *Nature* 396, 262.
- Ducrot, R., van Paassen, A., Barban, V., Daré, W., Gramaglia, C., 2015. Learning integrative negotiation to manage complex environmental issues: example of a gaming approach in the peri-urban catchment of São Paulo, Brazil. *Reg. Environ. Change* 15, 67–78.
- Dupré, M., Michels, T., Le Gal, P.-Y., 2017. Diverse dynamics in agroecological transitions on fruit tree farms. *Eur. J. Agron.* 90, 23–33.
- Duru, M., Papy, F., Soler, L.-G., 1988. Le concept de modèle général et l'analyse du fonctionnement de l'exploitation agricole. *CR Acad Agric Fr* 74, 81–93.
- Ehrenfeld, D.W., 1972. *Conserving life on earth*.
- Envilys, 2009. Diagnostic agro-environnemental de l'aire d'alimentation du captage de l'hippodrome à Oraison et Programme d'Actions. Envilys. http://doc-oai.eaurmc.fr/cindocoai/download/5849/2/MRS D 1433 1 4 SUITE2.pdf_856Ko
- EPTB Saône & Doubs, 2014. *Projet Agro-environnemental et Climatiques du Val de Saône en Rhône-Alpes*. EPTB Saône & Doubs et Natura 2000. https://www.eptb-saone-doubs.fr/IMG/pdf/2014_ra.pdf
- Étienne, M., 2010. *La modélisation d'accompagnement*. Editions Quae.
- Fageria, N.K., Baligar, V.C., 2005. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. *Adv. Agron.* 88, 97–185.
- Ferraton, M., 2016. *L'approche participative au service de la gestion intégrée de la ressource en eau: l'expérience des parcs naturels régionaux du Sud-Est de la France (PhD Thesis)*. Grenoble Alpes.
- Fezzi, C., Hutchins, M., Rigby, D., Bateman, I., Posen, P., Hadley, D., 2010. *Integrated Assessment of Water Framework Directive Nitrate Reduction Measures*.
- Foissy, D., Vian, J.-F., David, C., 2013. Managing nutrient in organic farming system: reliance on livestock production for nutrient management of arable farmland. *Org. Agric.* 3, 183–199.
- Fonder, N., Deneufbourg, M., Vandenberghe, C., Xanthoulis, D., Marcoen, J.M., 2010. Monitoring of nitrate leaching in croplands by lysimeters. *Biotechnol. Agron. Société Environ.* 14, 17.
- Gaigné, C., 2012. *Organisation des filières animales et environnement. Vingt ans après la directive nitrates*. *Prod. Anim.* 25, 375.
- Garcia, L., Celette, F., Gary, C., Ripoche, A., Valdés-Gómez, H., Metay, A., 2018. Management of service crops for the provision of ecosystem services in vineyards: A review. *Agric. Ecosyst. Environ.* 251, 158–170.
- Ghiotti, S., 2010. 7. Le «bon état écologique des eaux» pour 2015: une ambition qui bouscule la gestion des territoires en France, in: *L'eau Mondialisée. La Découverte*, pp. 143–159.
- Girard, N., 2015. Knowledge at the boundary between science and society: a review of the use of farmers' knowledge in agricultural development. *J. Knowl. Manag.* 19, 949–967.

- Girard, N., Navarrete, M., 2005. Quelles synergies entre connaissances scientifiques et empiriques? L'exemple des cultures du safran et de la truffe. *Nat. Sci. Sociétés* 13, 33–44.
- Girardin, P., Bockstaller, C., 2002. INDIGO. Méthode d'évaluation des systèmes de production à la parcelle. *SOLAGRO2002 Quels Diagn. Pour Quelles Actions Agroenvironnementales* 119–124.
- Girardin, P., Guichard, L., Bockstaller, C., 2005. Indicateurs et tableaux de bord: guide pratique pour l'évaluation environnementale. Lavoisier Tec & Doc.
- Gisclard, M., Chantre, É., Cerf, M., Guichard, L., 2015. Co-click'eau: une démarche d'intermédiation pour la construction d'une action collective locale? *Nat. Sci. Sociétés* 23, 3–13.
- Goulet, F., 2013. Narratives of experience and production of knowledge within farmers' groups. *J. Rural Stud.* 32, 439–447.
- Goulet, F., Pervanchon, F., Conteau, C., Cerf, M., 2008. Les agriculteurs innovent par eux-mêmes pour leurs systèmes de culture, in: R. Reau et T. Doré, *Systèmes de Culture Innovant et Durables*. Dijon, Educagri Éditions. pp. 53–69.
- Granath, J., Lindahl, G.A., Rehal, S., 1996. From Empowerment to Enablement. An evolution of new dimensions in participatory design. *Logist. Arb.* 8, 16–20.
- Gratecap, J.-B., 2014. Opportunité d'un développement de l'agriculture biologique pour préserver les ressources en eau potable sur les aires d'alimentation de captage : analyse des principes d'action à l'origine des pratiques d'agriculteurs conventionnels et biologiques sur deux territoires à enjeu eau en Rhône-Alpes. ISARA-Lyon.
- Grizzetti, B., Bouraoui, F., Billen, G., van Grinsven, H., Cardoso, A.C., Thieu, V., Garnier, J., Curtis, C., Howarth, R.W., Johnes, P., 2011. Nitrogen as a threat to European water quality.
- Guichard, L., Real, B., Desvignes, P., Wissocq, A., Zavagli, F., Bertrand, S., Morin, C., Morison, M., Reau, R., Schmidt, A., Bouveris, N., Cariolle, M., 2010. Caractérisation des pratiques de protection des cultures et de leur évolution : méthodologie de diagnostic et propositions visant à améliorer l'impact environnemental des systèmes de culture et d'élevage. http://isidoredd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/documents/Temis/0083/Temis-0083501/22331_Rapport.pdf
- Gurr, G.M., Wratten, S.D., Luna, J.M., 2003. Multi-function agricultural biodiversity: pest management and other benefits. *Basic Appl. Ecol.* 4, 107–116.
- Hall, J.K., Mumma, R.O., 1994. Dicamba mobility in conventionally tilled and non-tilled soil. *Soil Tillage Res.* 30, 3–17.
- Hall, J.K., Mumma, R.O., Watts, D.W., 1991. Leaching and runoff losses of herbicides in a tilled and untilled field. *Agric. Ecosyst. Environ.* 37, 303–314.
- Hardin, G., 1968. The tragedy of the commons. *science* 162, 1243–1248.
- Hassenforder, E., Ferrand, N., ANU, K.D., Barreteau, O., ANU, Q.G., ANU, J.P., 2015. Evaluer les effets institutionnels d'un dispositif de planification participative.
- Hatchuel, A., Le Masson, P., Weil, B., 2009. Design theory and collective creativity: a theoretical framework to evaluate KCP process, in: *International Conference on Engineering Design, ICED*. pp. 24–27.
- Hébert, J., 1969. La fumure azotée du blé tendre d'hiver. *Bull Tech Inf* 244, 755–766.
- Heilbroner, R.L., Heilbroner, R.L., Heilbroner, R.L., Heilbroner, R.L., 1974. *An inquiry into the human prospect*. Norton New York.
- Hellec, F., Barataud, F., Martin, L., 2013. Protection de l'eau et agriculture: une négociation au long cours. *Nat. Sci. Sociétés* 21, 190–199.

- Hénin, S., 1980. Rapport du groupe de travail " Activités agricoles et qualité des eaux". Ministère de l'agriculture.
- Hering, D., Borja, A., Carstensen, J., Carvalho, L., Elliott, M., Feld, C.K., Heiskanen, A.-S., Johnson, R.K., Moe, J., Pont, D., Solheim, A.L., de Bund, W. van, 2010. The European Water Framework Directive at the age of 10: A critical review of the achievements with recommendations for the future. *Sci. Total Environ.* 408, 4007–4019.
- Hill, S.B., MacRae, R.J., 1996. Conceptual framework for the transition from conventional to sustainable agriculture. *J. Sustain. Agric.* 7, 81–87.
- Hobbes, T., 1969. *Leviathan*, 1651. Scolar Press.
- Hoffmann, V., Probst, K., Christinck, A., 2007. Farmers and researchers: How can collaborative advantages be created in participatory research and technology development? *Agric. Hum. Values* 24, 355–368.
- Holderbaum, J.F., Decker, A.M., Messinger, J.J., Mulford, F.R., Vough, L.R., 1990. Fall-seeded legume cover crops for no-tillage corn in the humid East. *Agron. J.* 82, 117–124.
- Ifen, 2003. Le gestion de l'eau potable en France métropolitaine en 1998. (No. 40), Etudes et Travaux. Orléans. http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/Publications/Etudes_et_documents/2003/et40.pdf
- Ingram, J., 2008. Agronomist–farmer knowledge encounters: an analysis of knowledge exchange in the context of best management practices in England. *Agric. Hum. Values* 25, 405–418.
- Jean-Baptiste, S., Guichard, L., Reau, R., Prost, L., 2017. Co-construction d'un guide pour le diagnostic territorial des pressions et émissions agricoles. *Innov. Agron.* 57, 35–52.
- Jeuffroy, M.-H., Bergez, J.-E., David, C., Flénet, F., Gate, P., Loyce, C., Maupas, F., Meynard, J.-M., Reau, R., Surleau-Chambenoit, C., 2008a. Utilisation des modèles pour l'aide à la conception et à l'évaluation d'innovations techniques en production végétale: bilan et perspectives. *Agronomie* 18, 311–346.
- Jeuffroy, M.-H., Bergez, J.-E., David, C., Flénet, F., Gate, P., Loyce, C., Maupas, F., Meynard, J.-M., Reau, R., Surleau-Chambenoit, C., 2008b. Utilisation des modèles pour l'aide à la conception et à l'évaluation d'innovations techniques en production végétale: bilan et perspectives. *Agronomie* 18, 311–346.
- Jeuffroy, M.-H., Gate, P., Machet, J.-M., Recous, S., 2013. Gestion de l'azote en grandes cultures: les connaissances et outils disponibles permettent-ils de concilier exigences agronomiques et environnementales? *Cah. Agric.* 22, 249–257.
- Joannon, A., 2004. Coordination spatiale des systèmes de culture pour la maîtrise de processus hydrologiques. Cas du ruissellement érosif dans les bassins versants agricoles du Pays de Caux, Haute Normandie.
- Joannon, A., Souchère, V., Martin, P., Papy, F., 2006. Reducing runoff by managing crop location at the catchment level, considering agronomic constraints at farm level. *Land Degrad. Dev.* 17, 467–478.
- Johnson, N., Ravnborg, H.M., Westermann, O., Probst, K., 2002. User participation in watershed management and research. *Water Policy* 3, 507–520.
- Juan, G., Barataud, F., Benoit, P., Bouchet, L., CARPENTIER, A., Gouy, V., Le Henaff, G., Voltz, M., 2018. Référentiel sur les outils de la recherche pour réduire les pollutions de l'eau par les pesticides.
- Kallis, G., Butler, D., 2001. The EU water framework directive: measures and implications. *Water Policy* 3, 125–142.
- Kay, P., Grayson, R., Phillips, M., Stanley, K., Dodsworth, A., Hanson, A., Walker, A., Foulger, M., McDonnell, I., Taylor, S., 2012. The effectiveness of agricultural stewardship for improving water

- quality at the catchment scale: experiences from an NVZ and ECSFDI watershed. *J. Hydrol.* 422, 10–16.
- Khan, Z.R., Pickett, J.A., 2004. The 'push-pull' strategy for stemborer management: a case study in exploiting biodiversity and chemical ecology. *Ecol. Eng. Pest Manag. Adv. Habitat Manip. Arthropods* 155–164.
- Korsaeth, A., Eltun, R., 2000. Nitrogen mass balances in conventional, integrated and ecological cropping systems and the relationship between balance calculations and nitrogen runoff in an 8-year field experiment in Norway. *Agric. Ecosyst. Environ.* 79, 199–214.
- Kremen, C., Iles, A., Bacon, C., 2012. Diversified farming systems: an agroecological, systems-based alternative to modern industrial agriculture.
- Kuhfuss, L., 2013. Contrats agro-environnementaux: évaluation et dispositifs innovants en France (PhD Thesis). Montpellier 1.
- Kuhfuss, L., Jacquet, F., Preget, R., Thoyer, S., others, 2012. Le dispositif des MAEt pour l'enjeu eau: une fausse bonne idée? *Rev. D'Etudes En Agric. Environnement* Review Agric. Environ. Stud. 93, 395–421.
- Kuhfuss, L., Préget, R., Thoyer, S., Hanley, N., Le Coent, P., Désolé, M., others, 2015. Nudges, social norms and permanence in agri-environmental schemes. *Discuss. Pap. Environ. Econ.* 15.
- Kumar, K., Goh, K.M., 1999. Crop residues and management practices: effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yield, and nitrogen recovery, in: *Advances in Agronomy*. Elsevier, pp. 197–319.
- Lacroix, A., 1995. Les solutions agronomiques à la pollution azotée. *Courr. Environ. INRA* 24, 29–42.
- Lamine, C., Meynard, J.M., Perrot, N., Bellon, S., 2009. Analyse des formes de transition vers des agricultures plus écologiques: les cas de l'Agriculture Biologique et de la Protection Intégrée. *Innov. Agron.* 4, 483–493.
- Lançon, J., Reau, R., Cariolle, M., Munier-Jolain, N., Omon, B., Petit, M.-S., Viaux, P., Wery, J., 2008. Elaboration à dire d'experts de systèmes de culture innovants. *Systèmes Cult. Innovants Durables Quelles Méthodes Pour Mettre Au Point Évaluer* 91–107.
- Lançon, J., Wery, J., Rapidel, B., Gaborel, C., Gérardaux, E., Ballo, D., Brévault, T., Fadegnon, B., 2004. Prototyping integrated cotton crop management systems for specific ecological and socioeconomic constraints in Western Africa.
- Landais, E., 1994. Système d'élevage, in: *D'une Intuition Holiste à Une Méthode de Recherche, Le Cheminement d'un Concept-In*: C. Blanc-Pamard et J. Boutrais. pp. 15–49.
- Langeveld, J.W.A., Van Keulen, H., De Haan, J.J., Kroonen-Backbier, B.M.A., Oenema, J., 2005. The nucleus and pilot farm research approach: experiences from The Netherlands. *Agric. Syst.* 84, 227–252.
- Langeveld, J.W.A., Verhagen, A., Neeteson, J.J., Van Keulen, H., Conijn, J.G., Schils, R.L.M., Oenema, J., 2007. Evaluating farm performance using agri-environmental indicators: recent experiences for nitrogen management in The Netherlands. *J. Environ. Manage.* 82, 363–376.
- Larrue, C., 1992. Le comportement des agriculteurs face aux mesures de protection de l'eau. *Économie Rurale* 208, 42–49.
- Laurent, F., 2012. Agriculture et pollution de l'eau: modélisation des processus et analyse des dynamiques territoriales. Université du Maine.
- Le Bail, M., Aubry, C., Navarrete, M., Vaucelle, A., 2006. Agronomie et qualité dans les filières de production végétale. *Agron. Aujourd'hui* Quae Éditions Versailles 285–308.
- Le Gal, P.-Y., Dugué, P., Faure, G., Novak, S., 2011. How does research address the design of innovative agricultural production systems at the farm level? A review. *Agric. Syst.* 104, 714–728.

- Lefèvre, V., 2013. Conception de systèmes de culture innovates pour améliorer le fonctionnement des sols en agriculture biologique (PhD Thesis). Thèse de doctorat, Agronomie, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech).
- Lefèvre, V., Capitaine, M., Peigné, J., Roger-Estrade, J., 2014. Farmers and agronomists design new biological agricultural practices for organic cropping systems in France. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 623–632.
- Levain, A., Vertes, F., Ruiz, L., Delaby, L., 2014. Articuler injonction au changement et processus d'innovation dans un territoire à fort enjeu écologique: regards croisés sur une expérience d'accompagnement. *Fourrages* 217, 69–78.
- Liefferink, D., Wiering, M., Uitenboogaart, Y., 2011. The EU Water Framework Directive: A multi-dimensional analysis of implementation and domestic impact. *Land Use Policy* 28, 712–722.
- Lopez, B., Baran, N., Bourguine, B., 2015. An innovative procedure to assess multi-scale temporal trends in groundwater quality: Example of the nitrate in the Seine–Normandy basin, France. *J. Hydrol.* 522, 1–10.
- Loyce, C., Wery, J., 2006. Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture. *L'agronomie Aujourd'hui* QUAE Ed. 77–95.
- Macgregor, C.J., Warren, C.R., 2006. Adopting sustainable farm management practices within a Nitrate Vulnerable Zone in Scotland: the view from the farm. *Agric. Ecosyst. Environ.* 113, 108–119.
- Mancebo, F., 2006. *Le développement durable*. Paris Armand Colin.
- Martin, G., Felten, B., Duru, M., 2011. Forage rummy: A game to support the participatory design of adapted livestock systems. *Environ. Model. Softw.* 26, 1442–1453.
- Martinez, J., Guiraud, G., 1990. A lysimeter study of the effects of a ryegrass catch crop, during a winter wheat/maize rotation, on nitrate leaching and on the following crop. *Eur. J. Soil Sci.* 41, 5–16.
- Martínez, J., Guiraud, G., others, 1990. A lysimeter study of the effects of a ryegrass catch crop, during a winter wheat/maize rotation, on nitrate leaching and on the following crop. *J. Soil Sci.* 41, 5–16.
- Mary, B., 1992. Gérer l'interculture pour maîtriser la pollution nitrique. *Journ. Détude Intercult. Nitrates*.
- Mary, B., Vigour, N., Machet, J.M., 1992. Effet du changement des pratiques culturales sur le fonctionnement azote d'un bassin d'alimentation.
- Matzdorf, B., Lorenz, J., 2010. How cost-effective are result-oriented agri-environmental measures?—An empirical analysis in Germany. *Land Use Policy* 27, 535–544.
- Maxime, F., Mollet, J.-M., Papy, F., 1995. Aide au raisonnement de l'assolement en grande culture. *Cah. Agric.* 4, 351–362.
- Mazoyer, M., Roudart, L., 1997. *Histoire des agricultures du monde*, éd. du Seuil. Paris.
- McCown, R.L., 2002. Changing systems for supporting farmers' decisions: problems, paradigms, and prospects. *Agric. Syst.* 74, 179–220.
- McDermaid, K., 2005. *Social Profile: La Moine River Ecosystem Partnership*. Univ. Ill. Dep. Nat. Resour. Environ. Sci.
- Meisinger, J.J., Hargrove, W.L., Mikkelsen, R.L., Williams, J.R., Benson, V.W., 1991. Effects of cover crops on groundwater quality. *Cover Crops Clean Water Soil Water Conserv. Soc. Ankeny Iowa* 266, 793–799.
- Menard, A., Poux, X., Lumbroso, S., 2014. Protection des captages contre les pollutions diffuses agricoles : diagnostic, démarches et acteurs.
- Menconi, M.E., Grohmann, D., Mancinelli, C., 2017. European farmers and participatory rural appraisal: A systematic literature review on experiences to optimize rural development. *Land Use Policy* 60, 1–11.

- Merrington, G., Nfa, L.W., Parkinson, R., Redman, M., Winder, L., 2002. *Agricultural pollution: environmental problems and practical solutions*. CRC Press.
- Meynard, J.-M., 2017. *L'agroécologie, un nouveau rapport aux savoirs et à l'innovation*. OCL.
- Meynard, J.-M., 2012. Innover dans les systèmes de culture et de production. Apprendre À Innover Dans Un Monde Incert. *Concev. Futurs L'agriculture L'alimentation* 77–93.
- Meynard, J.M., Aggeri, F., Coulon, J.B., Habib, R., Tillon, J.P., 2006. *Recherches sur la conception de systèmes agricoles innovants*. Rapp. Groupe Trav.
- Meynard, J.-M., Savini, I., 2003. La désintensification: point de vue d'un agronome. *Doss. Environ. INRA* 23–33.
- Ministère de l'environnement, 2013. La conférence environnementale - deuxième feuille de route pour la transition écologique. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Feuille_de_route_2013_VDEF.pdf
- Mischler, P., Hocdé, H., Triomphe, B., Omon, B., 2008. Conception de systèmes de culture et de production avec des agriculteurs: partager les connaissances et les compétences pour innover. *Systèmes Cult. Innovants Durables Suelles Méthodes Pour Mettre Au Point Évaluer* 91–108.
- Mischler, P., Lheureux, S., Dumoulin, F., Menu, P., Sene, O., Hopquin, J.-P., Cariolle, M., Reau, R., Munier-Jolain, N., Faloya, V., others, 2009. Huit fermes de grande culture engagées en production intégrée réduisent les pesticides sans baisse de marge. *Courr. L'environnement L'INRA* 57, 73–91.
- Mitchell, G., May, A., McDonald, A., 1995. PICABUE: a methodological framework for the development of indicators of sustainable development. *Int. J. Sustain. Dev. World Ecol.* 2, 104–123.
- Morton, L.W., 2007. A different view: mid-west farmers' perceptions of water quality, in: *Annual Meeting of the Rural Sociological Society, Marriott Santa Clara, Santa Clara, California*. pp. 225–263.
- Munier-Jolain, N., Deytieux, V., Guillemin, J.-P., Granger, S., Gaba, S., 2008. Conception et évaluation multicritères de prototypes de systèmes de culture dans le cadre de la Protection Intégrée contre la flore adventice en grandes cultures. *Innov. Agron.* 3, 75–88.
- Navarrete, M., Bellon, S., Geniaux, G., Lamine, C., Penvern, S., Sautereau, N., Tchamitchian, M., 2012. L'écologisation des pratiques en arboriculture et maraîchage. *Enjeux et perspectives de recherches. Courr. Environ. Inra* 62, 57–70.
- Newig, J., Gaube, V., Berkhoff, K., Kaldrack, K., Kastens, B., Lutz, J., Schlus smeier, B., Adensam, H., Haberl, H., 2008. The role of formalisation, participation and context in the success of public involvement mechanisms in resource management. *Syst. Pract. Action Res.* 21, 423–441.
- Novak, S., 2008. *Méthodes de conception de systèmes de production innovants à l'échelle de l'exploitation agricole: Synthèse bibliographique (synthèse bibliographique)*. CIRAD et SOLPHY. <http://agritrop.cirad.fr/548356/>
- OCDE, 2003. *Mesures agro-environnementales: tour d'horizon des évolutions*. Direction de l'alimentation, de l'agriculture et de la pêche, direction de l'environnement.
- Oenema, J., Koskamp, G.J., Galama, P.J., 2001. Guiding commercial pilot farms to bridge the gap between experimental and commercial dairy farms; the project 'Cows & Opportunities.' *NJAS-Wagening. J. Life Sci.* 49, 277–296.
- Oenema, O., van Liere, L., Schoumans, O., 2005. Effects of lowering nitrogen and phosphorus surpluses in agriculture on the quality of groundwater and surface water in the Netherlands. *J. Hydrol.* 304, 289–301.
- Oenema, O., Witzke, H.P., Klimont, Z., Lesschen, J.P., Velthof, G.L., 2009. Integrated assessment of promising measures to decrease nitrogen losses from agriculture in EU-27. *Agric. Ecosyst. Environ., Reactive nitrogen in agroecosystems: Integration with greenhouse gas interactions* 133, 280–288.

- Ophuls, W., 1977. *Ecology and the Politics of Scarcity*. WH Freeman.
- Ostrom, E., 1990. *Governing the commons: The evolution of institutions for collective action*. Cambridge university press.
- Pahl-Wostl, C., Craps, M., Dewulf, A., Mostert, E., Tabara, D., Taillieu, T., 2007. Social learning and water resources management. *Ecol. Soc.* 12 2 2007.
- Pahl-Wostl, C., Hare, M., 2004. Processes of social learning in integrated resources management. *J. Community Appl. Soc. Psychol.* 14, 193–206.
- Papy, F., Malézieux, E., Trébuil, G., Jaeger, M., others, 2001. Interdependence of cultural systems in exploitation. *Modélisation Agroécosystèmes Aide À Décision* 51–74.
- Paravano, L., Prost, L., Reau, R., 2016. Brienon-sur-Armançon : pilotage dynamique des actions d'un territoire à enjeu nitrate, à l'aide d'un observatoire et d'un tableau de bord. *Agron. Environ. Sociétés* 6, 127–133.
- Payette, A., Champagne, C., 1997. *Le groupe de codéveloppement professionnel*. PUQ.
- Petit, C., Aubry, C., 2016. Typology of organic management styles in a cash-crop region using a multi-criteria method. *Org. Agric.* 6, 155–169.
- Pissonnier, S., Lavigne, C., Toubon, J.-F., Le Gal, P.-Y., 2016. Factors driving growers' selection and implementation of an apple crop protection strategy at the farm level. *Crop Prot.* 88, 109–117.
- Pretty, J.N., 1995. Participatory learning for sustainable agriculture. *World Dev.* 23, 1247–1263.
- Prost, L., Berthet, E.T., Cerf, M., Jeuffroy, M.-H., Labatut, J., Meynard, J.-M., 2017. Innovative design for agriculture in the move towards sustainability: scientific challenges. *Res. Eng. Des.* 28, 119–129.
- Queyrel, W., 2014. *Modélisation du devenir des pesticides dans les sols à partir d'un modèle agronomique: évaluation sur le long terme (PhD Thesis)*. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
- Ravier, C., 2017. *Conception innovante d'une méthode de fertilisation azotée: Articulation entre diagnostic des usages, ateliers participatifs et modélisation (PhD Thesis)*.
- Ravier, C., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., 2016. Mismatch between a science-based decision tool and its use: The case of the balance-sheet method for nitrogen fertilization in France. *NJAS-Wagening. J. Life Sci.* 79, 31–40.
- Ravier, C., Meynard, J.-M., Cohan, J.-P., Gate, P., Jeuffroy, M.-H., 2017. Early nitrogen deficiencies favor high yield, grain protein content and N use efficiency in wheat. *Eur. J. Agron.* 89, 16–24.
- Ravier, C., Prost, L., Jeuffroy, M.-H., Wezel, A., Paravano, L., Reau, R., 2015a. Multi-criteria and multi-stakeholder assessment of cropping systems for a result-oriented water quality preservation action programme. *Land Use Policy* 42, 131–140.
- Ravier, C., Prost, L., Jeuffroy, M.-H., Wezel, A., Paravano, L., Reau, R., 2015b. Multi-criteria and multi-stakeholder assessment of cropping systems for a result-oriented water quality preservation action programme. *Land Use Policy* 42, 131–140.
- Raymond, C.M., Fazey, I., Reed, M.S., Stringer, L.C., Robinson, G.M., Evely, A.C., 2010. Integrating local and scientific knowledge for environmental management. *J. Environ. Manage.* 91, 1766–1777.
- Reau, R., Bedu, M., Ferrané, C., Gratecap, J.B., Jean-Baptiste, S., Paravano, L., Parnaudeau, V., Prost, L., 2017. *Evaluation des émissions de nitrate des champs pour la conception de projets de territoire et l'accompagnement de la transition en aires d'alimentation de captage*. Innov. Agron. Sous Presse.
- Reau, R., Fortino, G., 2010. Entre description et évaluation des systèmes: le goulot d'étranglement du calcul des indicateurs pour MASC. *Le modèle MASC et ses utilisations pour l'évaluation de la durabilité des Systèmes de culture* 26.

- Reau, R., Guichard, L., Chantre, E., 2013. Évaluation agri-environnementale pour les apprentissages des acteurs des aires d'alimentation de captage. *Innov. Agron.* 31, 91–110.
- Reau, R., Monnot, L.-A., Schaub, A., Munier-Jolain, N., Pambou, I., Bockstaller, C., Cariolle, M., Chabert, A., Dumans, P., 2012. Les ateliers de conception de systèmes de culture pour construire, évaluer et identifier des prototypes prometteurs. *Innov. Agron.* 20, 5–33.
- Reed, M.S., 2008. Stakeholder participation for environmental management: a literature review. *Biol. Conserv.* 141, 2417–2431.
- Reisner, Y., De Filippi, R., Herzog, F., Palma, J., 2007. Target regions for silvoarable agroforestry in Europe. *Ecol. Eng.* 29, 401–418.
- Richard, A., Casagrande, M., Jeuffroy, M.-H., David, C., 2018. An innovative method to assess suitability of Nitrate Directive measures for farm management. *Land Use Policy* 72, 389–401.
- Richardson, M., 2005. À la recherche de savoirs perdus? Expérience, innovation et savoirs incorporés chez des agriculteurs biologiques au Québec. *Vertigo- Rev. Électronique En Sci. Environ.* 6.
- Röling, N.G., Wagemakers, M.A.E., 2000. Facilitating sustainable agriculture: participatory learning and adaptive management in times of environmental uncertainty. Cambridge University Press.
- Romera, A.J., Morris, S.T., Hodgson, J., Stirling, W.D., Woodward, S.J.R., 2004. A model for simulating rule-based management of cow-calf systems. *Comput. Electron. Agric.* 42, 67–86.
- Rosset, P.M., Martínez-Torres, M.E., 2012. Rural social movements and agroecology: context, theory, and process. *Ecol. Soc.* 17, 17.
- Ryan, P.R., Dessaux, Y., Thomashow, L.S., Weller, D.M., 2009. Rhizosphere engineering and management for sustainable agriculture. *Plant Soil* 321, 363–383.
- Ryschawy, J., Joannon, A., Choisis, J.P., Gibon, A., Le Gal, P.-Y., 2014. Participative assessment of innovative technical scenarios for enhancing sustainability of French mixed crop-livestock farms. *Agric. Syst.* 129, 1–8.
- Sabatier, R., Doyen, L., Tichit, M., 2012. Action versus result-oriented schemes in a grassland agroecosystem: a dynamic modelling approach. *PLoS One* 7.
- Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J.-É., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Doré, T., 2009. Ex ante Assessment of the Sustainability of Alternative Cropping Systems: Implications for Using Multi-criteria Decision-Aid Methods-A Review, in: *Sustainable Agriculture*. Springer, pp. 753–767.
- Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J.-E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Landé, N., Coquil, X., Messéan, A., others, 2007. An indicator-based MCDA framework for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems., in: *Farming Systems Design 2007, Int. Symposium on Methodologies on Integrated Analysis on Farm Production Systems*.
- Saqalli, M., Caron, P., Defourny, P., Issaka, A., 2009. The PBRM (perception-based regional mapping): A spatial method to support regional development initiatives. *Appl. Geogr.* 29, 358–370.
- Scheidleder, A., others, 1999. Groundwater quality and quantity in Europe. Office for Official Publications of the European Communities.
- Schneider, A., Flénet, F., Dumans, P., Bonnin, E., De Chezelles, E., Jeuffroy, M.-H., Hayer, F., Nemecek, T., Carrouée, B., 2010. Diversifier les rotations céréalières notamment avec du pois et du colza—Données récentes d'expérimentations et d'études. *Ol. Corps Gras Lipides* 17, 301–311.
- Scholberg, J.M., Dogliotti, S., Leoni, C., Cherr, C.M., Zotarelli, L., Rossing, W.A., 2010. Cover crops for sustainable agrosystems in the Americas, in: *Genetic Engineering, Biofertilisation, Soil Quality and Organic Farming*. Springer, pp. 23–58.
- Scottish Water, 2012. Sustainable Land Management: Best Practice Incentive Scheme For the Protection of Drinking Water Sources.

- Sebillotte, M., 1990. Conclusion. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes.
- Sebillotte, M., 1979. Analyse du fonctionnement des exploitations agricoles. Trajectoire et typologie. *Eléments Pour Une Problématique Rech. Sur Systèmes Agraires Dév. Assem. Const. Dép. SAD Toulouse* 20, 1979.
- Sebillotte, M., 1978. Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. *Comptes Rendus Séances Académie Agric. Fr.*
- Sebillotte, M., Soler, L.-G., 1990. Les processus de décision des agriculteurs., in: *Seminaire Du Département de Recherches Sur Les Systemes Agraires et Le Developpement (SAD). Seminar of the Département de Recherches Sur Les Systemes Agraires et Le Developpement (SAD). Saint Maximin (France). 2-3 Mar 1989.*
- Seddaiu, G., Porcu, G., Ledda, L., Roggero, P.P., Agnelli, A., Corti, G., 2013. Soil organic matter content and composition as influenced by soil management in a semi-arid Mediterranean agro-silvo-pastoral system. *Agric. Ecosyst. Environ.* 167, 1–11.
- SMEP Saône-Turdine, 2011. Etude de délimitation des aires d'alimentation des captages (Phase 1 - états des lieux et synthèse bibliographique). CPGF-HORIZON, OPQIBI.
- Smith, R.J., 1981. Resolving the tragedy of the commons by creating private property rights in wildlife. *Cato J* 1, 439.
- Smith, R.J.N., Glegg, G.A., Parkinson, R., Richards, J.P., 2007. Evaluating the implementation of the Nitrates Directive in Denmark and England using an actor-orientated approach. *Eur. Environ.* 17, 124–144.
- Souchère, V., King, C., Dubreuil, N., Lecomte-Morel, V., Le Bissonais, Y., Chalot, M., 2003. Grassland and crop trends: role of the European Union Common Agricultural Policy and consequences for runoff and soil erosion. *Environ. Sci. Policy* 6, 7–16.
- Souchère, V., Millair, L., Echeverria, J., Bousquet, F., Le Page, C., Etienne, M., 2010. Co-constructing with stakeholders a role-playing game to initiate collective management of erosive runoff risks at the watershed scale. *Environ. Model. Softw.* 25, 1359–1370.
- Soulard, C.T., 2005. Les agriculteurs et la pollution des eaux. Proposition d'une géographie des pratiques. *Nat. Sci. Sociétés* 13, 154–164.
- Speelman, E.N., García-Barrios, L.E., Groot, J.C.J., Tittonell, P., 2014. Gaming for smallholder participation in the design of more sustainable agricultural landscapes. *Agric. Syst.* 126, 62–75.
- Sterk, B., Van Ittersum, M.K., Leeuwis, C., Wijnands, F.G., 2007. Prototyping and farm system modelling—Partners on the road towards more sustainable farm systems? *Eur. J. Agron.* 26, 401–409.
- Stoorvogel, J.J., Antle, J.M., Crissman, C.C., Bowen, W., 2004a. The tradeoff analysis model: integrated bio-physical and economic modeling of agricultural production systems. *Agric. Syst.* 80, 43–66.
- Stoorvogel, J.J., Bouma, J., Orlich, R.A., 2004b. Participatory research for systems analysis: prototyping for a Costa Rican banana plantation. *Agron. J.* 96, 323–336.
- Thiébaud, F., Cozic, P., Véron, F., Brau-Nogué, C., Bornard, A., 2001. Intérêts et limites des différents couverts fourragers et pratiques associées vis-à-vis de l'environnement. *Analyse bibliographique. Fourrages* 168, 449–475.
- Thies, C., 1999. Landscape Structure and Biological Control in Agroecosystems. *Science* 285, 893–895.
- Thornton, P.K., Herrero, M., 2001. Integrated crop–livestock simulation models for scenario analysis and impact assessment. *Agric. Syst.* 70, 581–602.
- Thoyer, S., Saïd, S., 2007. Mesures agri-environnementales: quels mécanismes d'allocation? *Conserv. Biodiversité Polit. Agric. Commune L'Union Eur. Doc. Fr. Paris.*

- Tilman, D., Reich, P.B., Knops, J.M., 2006. Biodiversity and ecosystem stability in a decade-long grassland experiment.
- Turpin, N., Vernier, F., Joncour, F., 1997. Transferts de nutriments des sols vers les eaux-Influence des pratiques agricoles-Synthèse bibliographique. *Ingénieries-EAT* p-3.
- Ullrich, A., Volk, M., 2009. Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity. *Agric. Water Manag.* 96, 1207–1217.
- Vall, E., Chia, E., Blanchard, M., Koutou, M., Coulibaly, K., Andrieu, N., 2016. La co-conception en partenariat de systèmes agricoles innovants. *Cah. Agric.* 25, 15001.
- van der Werf, H.M., 1996. Assessing the impact of pesticides on the environment. *Agric. Ecosyst. Environ.* 60, 81–96.
- van der Werf, H.M.G., Petit, J., 2002. Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level: a comparison and analysis of 12 indicator-based methods. *Agric. Ecosyst. Environ.* 93, 131–145.
- Vayssières, J., 2008. Modélisation participative et intégration des pratiques décisionnelles d'éleveurs dans un modèle global d'exploitation: application à l'évaluation de la durabilité des élevages laitiers d'une île tropicale. Montpellier SupAgro.
- Vereijken, P., 1997. A methodical way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. *Dev. Crop Sci.* 25, 293–308.
- Vereijken, P.H., Cereales, S., 1999. Manual for prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. Citeseer.
- Vernoux, J.F., Wuilleumier, A., Dörfliger, N., 2007. Délimitation des bassins d'alimentation des captages et cartographie de leur vulnérabilité vis-à-vis des pollutions diffuses. Guide méthodologique. rapport BRGM/RP-55874-FR.
- Vincent, A., 2016. Agriculture et protection de la qualité de l'eau: géo-agronomie des conditions de développement de l'agriculture biologique à l'échelle territoriale.
- Watts, D.B., Torbert, H.A., Prior, S.A., 2010. Soil property and landscape position effects on seasonal nitrogen mineralization of composted dairy manure. *Soil Sci.* 175, 27–35.
- Wezel, A., Bellon, S., Doré, T., Francis, C., Vallod, D., David, C., 2011. Agroecology as a science, a movement and a practice, in: *Sustainable Agriculture Volume 2*. Springer, pp. 27–43.
- Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J.-F., Ferrer, A., Peigné, J., 2014. Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 1–20.
- Whitby, M., 2000. Challenges and Options for the UK Agri-Environment: Presidential Address. *J. Agric. Econ.* 51, 317–332.
- Widdison, P.E., Burt, T., Hudson, R., 2004. Water Framework Directive: Implications for Farmers in The Leet Water Catchment. *Mitig. Meas.* 117.
- Willaume, M., Rollin, A., Casagrande, M., 2014. Farmers in southwestern France think that their arable cropping systems are already adapted to face climate change. *Reg. Environ. Change* 14, 333–345.
- Zebarth, B.J., Drury, C.F., Tremblay, N., Cambouris, A.N., 2009. Opportunities for improved fertilizer nitrogen management in production of arable crops in eastern Canada: A review. *Can. J. Soil Sci.* 89, 113–132.
- Zingore, S., González-Estrada, E., Delve, R.J., Herrero, M., Dimes, J.P., Giller, K.E., 2009. An integrated evaluation of strategies for enhancing productivity and profitability of resource-constrained smallholder farms in Zimbabwe. *Agric. Syst.* 101, 57–68.

TABLE DES MATIERES.

LISTE DES ABREVIATIONS	1
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1. ETAT DE L'ART ET PROBLEMATIQUE	4
1. La politique de l'eau en France et les raisons de son efficacité partielle.....	5
1.1 Contamination des eaux souterraines	5
1.1.1 <i>Notions générales.....</i>	<i>5</i>
1.1.2 <i>Bilan et origine de la pollution actuelle des eaux souterraines par les nitrates et les pesticides</i>	<i>5</i>
1.1.3 <i>Les mécanismes de transfert de l'azote vers les nappes phréatiques et les facteurs influençant ce phénomène</i>	<i>8</i>
1.1.4 <i>Les mécanismes de transfert des pesticides vers les nappes phréatiques et les facteurs influençant ce phénomène</i>	<i>9</i>
1.2 La politique de l'eau en France	12
1.2.1 <i>Les instruments mis en œuvre par la politique de l'eau</i>	<i>12</i>
1.2.2 <i>Les recommandations pour protéger et/ou reconquérir la qualité des eaux souterraines</i>	<i>16</i>
1.2.3 <i>Évolution de la pollution des eaux souterraines en France et raisons de l'efficacité partielle des recommandations pour protéger et/ou reconquérir la qualité des eaux souterraines</i>	<i>17</i>
2. Protéger et/ou reconquérir la qualité des eaux souterraines : quelle échelle d'approche ?	21
2.1 Les différents instruments mis en œuvre pour permettre la reconquête et/ou protection de la qualité des eaux souterraines.....	21
2.2 Les outils pour concevoir des scénarios	23
2.2.1 <i>Concevoir à partir de l'expérimentation.....</i>	<i>24</i>
2.2.2 <i>Concevoir à partir de modèle, méthode in silico</i>	<i>24</i>
2.2.3 <i>Concevoir par le renforcement de la capacité des acteurs.....</i>	<i>24</i>
2.3 Les scénarios issus de la recherche et développement pour reconquérir et/ou protéger la qualité des eaux souterraines	25
2.3.1 <i>Des solutions techniques issues de la Recherche et Développement</i>	<i>25</i>
2.3.2 <i>La conception innovante de système de culture.....</i>	<i>27</i>
2.3.3 <i>La conception à l'échelle du territoire à enjeu eau.....</i>	<i>29</i>
2.4 Nécessité d'une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole pour atteindre un objectif de mise en œuvre.....	31
2.4.1 <i>Les raisons d'une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole.....</i>	<i>31</i>
2.4.1 <i>Le cadre d'analyse basée sur une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole.....</i>	<i>33</i>
3. Engager un changement dans la durée : les apports d'une approche participative.....	34
3.1 Nécessité d'une approche participative pour la gestion durable d'une ressource naturelle..	34
3.2 Mobilisation des connaissances et flux d'informations lors des démarches participatives....	35
3.3 Classification et caractéristiques des démarches participatives s'appuyant sur une approche systémique appliquée à l'échelle de l'exploitation agricole.....	36

3.3.1	Type I : « Information » couplée à une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole.....	36
3.3.2	Type II : « Consultation » couplée à une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole.....	37
3.3.3	Type III : « Dialogue » couplé à une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole	38
3.3.4	Type IV : « Co-conception » couplée à une approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole.....	39
4.	Questions et démarche de recherche.....	40
CHAPITRE 2. PRESENTATION DES DEUX CAS D'ETUDE		44
1.	Critères de choix des territoires étudiés.....	45
2.	Caractéristiques des deux terrains d'étude	47
3.	Étude des mesures de la politique de l'eau : deux cas d'étude sur des AAC aux contextes réglementaires similaires	49
3.1	Val de Durance : caractéristiques de ses masses d'eau et de l'AAC « Hippodrome ».....	49
3.2	Plaine des Chères : caractéristiques de son AAC.....	53
3.3	Contexte réglementaire identique : la directive nitrates	56
4.	Démarche participative : deux groupes d'agriculteurs avec des dynamiques contrastées	57
CHAPITRE 3. EVALUATION DE L'ADEQUATION DES MESURES ISSUES DE LA POLITIQUE DE L'EAU AVEC LE FONCTIONNEMENT DES EXPLOITATIONS AGRICOLES		60
1.	Étude de l'adéquation des mesures de la politique de l'eau avec le fonctionnement des exploitations agricoles de l'AAC de la plaine des chères	61
1.1	Résumé/Abstract.....	61
1.2	Introduction	63
1.3	Material and methods.....	65
1.3.1	Case study	65
1.3.2	Methodological approach	67
1.4	Results	71
1.4.1	Step 1: Diversity in the implementation of the ND's measures and their determinants	71
1.4.2	Step 2: Farm scale structural impacts of the implementation of the ND's measures.....	75
1.4.3	Step 3: Consistency of the implementation of the ND's measures with the farmers' strategy	75
1.4.4	Step 4: ND's measures suitability for farm management.....	78
1.4.5	Step 5: Typology of farm management.....	79
1.5	Discussion and conclusion.....	80
1.5.1	Conditions within farm management for optimising the implementation of the ND's measures to reduce pressure on groundwater quality.....	80
1.5.2	Usefulness of the farm scale method	82
ACKNOWLEDGEMENTS		82
2.	Étude de l'adéquation des mesures de la politique de l'eau avec le fonctionnement des exploitations agricoles de l'AAC d'Oraison	83
2.1	Caractéristiques des exploitations agricoles et du cadre réglementaire	83
2.2	Résultats en Val de Durance.....	84

2.2.1	<i>Étape 1 : Diversité d'insertion des mesures</i>	84
2.2.2	<i>Étape 2 : Impact structurel des mesures</i>	88
2.2.3	<i>Étape 3 : Cohérence stratégique des mesures</i>	88
2.2.4	<i>Étapes 4 & 5 : Adéquation des mesures et typologie des agriculteurs</i>	89
3.	Synthèse de l'analyse de la politique de l'eau sur les deux terrains	91
3.1	Les cinq déterminants de la diversité d'application des mesures de la DN	91
3.2	Proposition pour une typologie générique des exploitations agricoles sur des zones à enjeu eau et vérification du lien adéquation/abandon.....	92
3.2.1	<i>Type I</i>	94
3.2.2	<i>Type II</i>	95
3.2.3	<i>Type III</i>	96
CHAPITRE 4. DÉMARCHE DE CO-CONCEPTION DE SCÉNARIOS SUR-MESURE À L'ÉCHELLE DE L'EXPLOITATION AGRICOLE.....		100
1.	Mise au point de la méthode participative de conception de scénarios sur mesure et application sur les deux cas d'étude	101
1.1	Résumé/Abstract.....	101
1.2	Introduction	102
1.3	Material and method	104
1.3.1	<i>Individual interviews and collective workshops</i>	104
1.3.2	<i>The method's five steps</i>	105
1.3.3	<i>Method testing</i>	109
1.4	Results	110
1.4.1	<i>Diversity of re-design element during the first collective workshop</i>	110
1.4.2	<i>Farm-scale evaluation of customized scenarios</i>	113
1.5	Discussion.....	114
1.5.1	<i>May this participatory method foster change by farmers?</i>	115
1.5.2	<i>Keys to success: the facilitator and recipient farmer</i>	117
1.5.3	<i>Method limitations and potential improvements</i>	118
1.6	Conclusion	118
1.7	Acknowledgment	119
1.8	Appendix 1	119
2.	Les recommandations co-conçus pour répondre aux objectifs des agriculteurs et diminuer la pression polluante sur les eaux souterraines	121
2.1	Retour sur l'évaluation <i>ex ante</i> à l'échelle de l'exploitation agricole : objectifs visés et indicateurs retenus.....	121
2.1.1	<i>Indicateurs liés aux performances agronomiques</i>	122
2.1.2	<i>Indicateurs liés aux performances économiques</i>	123
2.1.3	<i>Indicateurs liés aux performances sociales</i>	124
2.1.4	<i>Indicateurs liés à la pression polluante sur la qualité des eaux souterraines</i>	124

2.2	Les effets des recommandations sur la pression polluante intervenant sur les eaux souterraines.....	126
CHAPITRE 5. DISCUSSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....		132
1.	Quels apports scientifiques de la démarche développée dans cette thèse ?.....	133
1.1	Développement d'un cadre d'analyse à l'échelle de l'exploitation agricole pour répondre aux questions de recherche	133
1.2	Développement d'une démarche de co-conception avec et par les agriculteurs pour favoriser le changement.....	135
1.2.1	<i>Évaluation de la démarche participative pour protéger la qualité des eaux souterraine.....</i>	<i>135</i>
1.2.2	<i>Évaluation des scénarios</i>	<i>141</i>
1.3	Retour sur l'outil d'évaluation des scénarios	142
1.4	Avantages et limites de cette démarche participative centrée sur les agriculteurs	143
2.	Quelles perspectives opérationnelles pour une reconquête de la qualité des eaux souterraines ?	147
2.1	Premier guide méthodologique	148
2.2	Deuxième guide méthodologique	149
CONCLUSION.....		154
REFERENCES.		158
TABLE DES MATIERES.		173
TABLE DES FIGURES.		177
TABLE DES TABLEAUX.		180
TABLE DES ENCADRES.		182
ANNEXES.....		183

TABLE DES FIGURES.

Figure 1. 1: Concentration moyenne en pesticides dans les eaux souterraines par unité hydrogéologique, en moyenne, en 2011 (sources : agence et offices de l'Eau : BRGM, banque ADES et BD Lisa. Traitements : SOeS, 2013).....	6
Figure 1. 2: Concentration moyenne en nitrates dans les eaux souterraines par unité hydrogéologique en 2014 (source : agences et offices de l'Eau ; ARS ; collectivités territoriales ; BRGME : banque de données Ades, 2013. Traitements : SOeS, 2016).....	7
Figure 1. 3: Schéma qui présente les différents facteurs qui influencent le phénomène de lixiviation de pesticides et nitrates.....	10
Figure 1. 4: carte des douze bassins hydrographiques français (source : Assemblée nationale ; rapport d'information n°3425 sur les continuités écologiques aquatiques, janvier 2016).....	12
Figure 1. 5: Présentation de l'évolution de la politique de l'eau en France (ses 3 lois) et ses instruments visant la limitation des pollutions de l'eau par les nitrates et pesticides (* Directives européennes)	15
Figure 1. 6: Cause principale et nombre d'abandons correspondant par département (source : Ministère de la santé – ARS – SISE-Eaux, 2012).....	18
Figure 1. 7 : Schéma qui présente les différents facteurs qui influencent le phénomène de lixiviation de pesticides et nitrates et les échelles auxquelles portent les solutions issues de la recherche et développement.....	30
Figure 1. 8: Schéma qui présente les différents facteurs qui influencent le phénomène de lixiviation de pesticides et nitrates et les interactions/interdépendances entre les systèmes de culture, les ressources et l'environnement socio-économique qui constituent une exploitation agricole.....	32
Figure 1. 9 : Schéma de fonctionnement d'une exploitation agricole	33
Figure 1. 10: Schéma de l'organisation du manuscrit de thèse composé de deux sous-questions de recherche. Travail de recherche partant du constat des eaux souterraines polluées pour viser la reconquête à long terme de la qualité des eaux souterraines.	42
Figure 2. 1: Masses d'eau affleurantes sur le bassin Rhône Méditerranée Corse qui présentent un enjeu de reconquête de la qualité des eaux souterraines et localisation des deux terrains d'étude (source : SDAGE RHONE-MEDITERRANEE 2016-2021, Agence de l'eau).....	47
Figure 2. 2: Schéma des deux cas d'étude qui présentent la localisation des parcelles des agriculteurs qui ont été enquêté pour l'étude de l'adéquation des mesures avec le fonctionnement de leur exploitation et/ou qui ont participé à la démarche participative	48
Figure 2. 3: Chronologie des démarches réglementaires du cas d'étude 1	51
Figure 2. 4: Aire d'Alimentation du Captage « Hippodrome » et le parcellaire des exploitants agricoles (EA) enquêtés (Source : enquêtes et Registre Parcellaire Graphique (04), Annabelle Richard).....	52
Figure 2. 6: Aire d'Alimentation « Plaine des chères » et le parcellaire des exploitants agricoles (EA) enquêtés (Source : enquêtes et Registre Parcellaire Graphique (04), Annabelle Richard).....	54
Figure 2. 5: Chronologie des démarches réglementaires du cas d'étude 1	55

Figure 3. 1: Geographical location of the study area with the NVZ (a) and land occupation of the surveyed farmers in the study area (b) (source: farmers' interview).....	65
Figure 3. 2: Overall approach of the study: a combination of five steps to assess the suitability of the ND for farm management.....	68
Figure 3. 3: Les radars des exploitations agricoles de type I qui représentent l'impact structurel (en bleu) des mesures après leur insertion dans l'exploitation et leur cohérence stratégique avec la stratégie des agriculteurs (cf. Encadré 3)	94
Figure 3. 4: Les radars des exploitations agricoles de type II qui représentent l'impact structurel (en bleu) des mesures après leur insertion dans l'exploitation et leur cohérence stratégique avec la stratégie des agriculteurs (cf. Encadré 3)	95
Figure 3. 5: Les radars des exploitations agricoles de type III qui représentent l'impact structurel (en bleu) des mesures après leur insertion dans l'exploitation et leur cohérence stratégique avec la stratégie des agriculteurs (cf. Encadré 3)	96
Figure 3. 6: Schéma d'organisation du manuscrit de thèse avec les résultats du chapitre 3 et l'introduction du chapitre 4. Travail de recherche partant du constat des eaux souterraines polluées pour viser la reconquête à long terme de la qualité des eaux souterraines	99
Figure 4. 1: Five steps of the participatory approach described in this study.....	105
Figure 4. 2: Artefact of <i>recipient</i> farmer A's management regime. It represents the farm's equipment, usable farm area (UFA), land use (in hectares), and cropping systems (A, B, C and D; locations shown on map). Crop sequences, cover crops, and key actions are indicated for each cropping system.	106
Figure 4. 3: Analysis of the differences between the current farm management regime and (a) re-design farm management regimes incorporating single changes and (b) a redesigned farm management regime incorporating multiple changes	108
Figure 4. 4: Geographical origins of the study groups	109
Figure 4. 5: The graphs depict the difference (%) in the indicator values for the current farm management regimes and the re-design farm management regimes (incorporating multiple changes) for the four <i>recipient</i> farmers (A, E, F, G) who retained some of the proposed re-design elements. The change in agricultural performance is reflected by the difference in soil organic matter content (Δ OMC). The change in economic performance is reflected by the difference in total cost (Δ C) and net margin (Δ NM). The change in social performance is reflected by the difference in working hours per hectare per year (Δ WH). The change in groundwater quality is reflected by the difference in the nitrogen balance (Δ N) and treatment frequency index of active molecules (Δ TFI _{am}).....	113
Figure 5. 1 : Schéma qui présente les trois sous-questions de recherche associés au cadre conceptuel et méthodes utilisés pour arriver aux résultats de la thèse	134
Figure 5. 2 : Photographie d'un groupe d'agriculteurs au cours de l'atelier 1bis. On observe l'agriculteur <i>témoin</i> (de dos), deux des trois agriculteurs <i>conseillers</i> (à gauche) et la facilitatrice (de dos) avec le plateau au milieu de la table qui présente l'exploitation agricole du témoin.	137
Figure 5. 3: Présentation des étapes clés de la démarche participative sur le terrain de Val de Durance. Il y a eu deux tours de la phase de co-développement (étapes 1, 2, cf. chapitre 4 § 1.3.2) et les outils et méthodes ont évolué au cours de l'application de la démarche participative.	139

Figure 5. 4: Présentation des étapes clés de la démarche participative sur le terrain Plaine des Chères. Cette application de la méthode participative vient après une première expérience sur le terrain de Val de Durance.....	140
Figure 5. 5: Schéma de la démarche globale de la thèse qui présente les résultats de la partie 1 et la transition vers la partie 2 et sa démarche de co-conception.....	146
Figure 5. 6 : Les quatre enjeux opérationnels identifiés (Juan et.al, 2018) et le positionnement des méthodologies développées dans la thèse par rapport aux objectifs de ces enjeux (en bleu, la cadre d'analyse développée en chapitre 3 et en orange la méthode de co-conception développée en chapitre 4)	148

TABLE DES TABLEAUX.

Tableau 1.1: Description des mesures sur la limitation des pollutions par les nitrates et les pesticides (*mesures présentes dans le Programme d’Action de la Directive Nitrates) (Menard et al., 2014).	16
Tableau 1.2: Principales caractéristiques de cas d’études européens pour protéger la qualité des eaux souterraines. La sélection de ces cas d’étude s’est faite de manière à qu’ils illustrent les échelles auxquelles sont conçus les scénarios et les différents outils et méthodes mis en place pour favoriser le changement des pratiques agricoles sur un territoire à enjeu eau	22
Tableau 1.3 : présentation des recommandations de pratiques agricoles pour diminuer la pollution des pesticides des eaux souterraines (Aubertot et al., 2007)	26
Tableau 1.4 : Typologie des démarches participatives en fonction du type de participation des agriculteurs	36
Tableau 2. 1: Présentation des terrains présélectionnés puis retenus ou abandonnés suivant la validation des critères (en rouge = critère non respecté).....	46
Tableau 2. 2: Présentation des deux AAC et leurs caractéristiques.....	49
Tableau 2. 3: Présentation du contenu du PA de l’AAC « Plain des Chères » et du PAEC Val de Saône.....	55
Tableau 2. 4: Présentation des mesures réglementaires issues de la DN du programme d’action.....	56
Tableau 2. 5: Caractéristiques des groupes d’exploitations agricoles participant à la démarche participative	57
Table 3. 1: Main characteristics of the 14 surveyed farms in the NVZ.....	66
Table 3. 2 : Characteristics of the applicable measures in the case study from the ND	67
Table 3. 3: Final analytical framework of the ND’s measures suitability for farm management (step 4)....	70
Table 3. 4: Structural impacts on farms, identified from the before/after implementation of the cover soil measures: scales of the related structural modifications and number of involved farmers	72
Table 3. 5: Structural impacts on farms, identified from before/after implementation of the fertilisation measures: scales of related structural modifications and number of involved farmers (FP – Fertilisation Plan; DSS – Decision Support System)	73
Table 3. 6: Structural impacts in farms, identified from the before/after implementation of the spatio-temporal limitation measures: scales of related structural modifications and number of involved farmers	74
Table 3. 7: Seven types of objectives set by the farmers in the studied catchment area. Each type is described by the most typical practices or a verbatim account from the interviewed farmers.....	76
Table 3. 8: Overall strategic consistency (‘YES’ green) and inconsistency (‘NO’ red) of the implementation of the ND’s measures for each farmer (na: not applicable; grey: not concerned) - Combination of agronomic consistency (dark colour) and strategic objectives consistency as economic, social, and environmental (light colour)	78
Table 3. 9: Suitability of each ND measure for farm management for the 14 surveyed farmers (Mod.: moderate, NC: Not concerned).....	79

Tableau 3. 1 : Principales caractéristiques des 8 exploitants agricoles (EA) enquêtés (Arbo – arboriculture & M – maïs, B – Blé, C – Colza, Cs – Colza semence, T – Tournesol, S – Soja, S* – Soja dérobé, So – Sorgho ; O – Orge, SF – Sainfoin ; P – Pois ; Luz – luzerne	84
Tableau 3. 2: Diversité d'insertion des mesures de couverture du sol et leur Impact Structurel (IS).....	85
Tableau 3. 3: Diversité d'insertion de la gestion de la fertilisation azoté et leur Impact Structurel (IS).....	85
Tableau 3. 4: Diversité d'insertion des mesures aux contraintes spatio-temporelles et leur Impact Structurel (IS)	86
Tableau 3. 5 : Diversité d'insertion des mesures de la Charte et leur Impact Structurel (IS).....	87
Tableau 3. 6: Présentation de la cohérence (rouge) et l'incohérence (vert) stratégique de chaque mesure qui résulte de l'opinion de l'agriculteur sur les bénéfices agronomiques (en foncé) et les autres performances (économique et sociale et environnementale) (en clair).....	89
Tableau 3. 7: Résultat de l'adéquation de chaque mesure étudiée issue de la réglementation pour la protection de la qualité de l'eau avec le fonctionnement global de chaque exploitation agricole cultivant sur l'AAC hippodrome	89
Tableau 3. 8: Présentation des caractéristiques principales des 22 exploitations agricoles regroupées selon l'adéquation des mesures avec leur fonctionnement et résultat du nombre de mesures abandonnées par groupe de mesure	93
Table 4. 1: Analytical framework for determining the suitability of re-design element for farm management (Richard et al., 2018).....	107
Table 4. 2: Main characteristics of the farms run by the seven focal <i>recipient</i> farmers (RF). The table indicates the farmer's specific challenge or objective, tillage system (I: conventional, II: conservation), cropping systems (CS; land use in ha/irrigation status), usable farm area (UFA; in ha), and annual work units (AWUs).	109
Table 4. 3: Cropping-system-specific recommendations proposed to different <i>recipient</i> farmers (RF). Solution suitability, selection, and implementation are indicated.	111
Table 4. 4 : Stages in the first collective workshop (*stages taking place in small groups)	119
Table 4. 5 : Comparison of the values of the agricultural, economic, social, and groundwater quality indicators for the current and redesigned farm management regimes for the four <i>recipient</i> farmers that retained re-design elements	120
Tableau 4. 1 : Présentation des avantages et inconvénients des indicateurs les plus utilisés pour évaluer la pression sur la qualité des eaux souterraines	126
Tableau 4. 2 : Résultat d'évaluation multicritère des propositions de changement associés à l'agriculteur <i>témoin</i> et regroupés en fonction de la stratégie à laquelle ils répondent. Les valeurs qui sont cohérents avec l'objectif sont en vert et ceux qui sont incohérents en rouge. Les valeurs en gras présentent celles qui correspondent à la stratégie exprimée par le <i>témoin</i> ou le conseiller lors de la phase de <i>consultation</i>	128
Tableau 5. 1 : Liste des variables pour évaluer l'effet institutionnel et organisationnel de la démarche participative et de son contexte	136
Tableau 5. 2 : Présentation des guides et outils d'animation qui permettent de répondre à l'enjeu de reconquête de la qualité des eaux souterraines.....	150

TABLE DES ENCADRES.

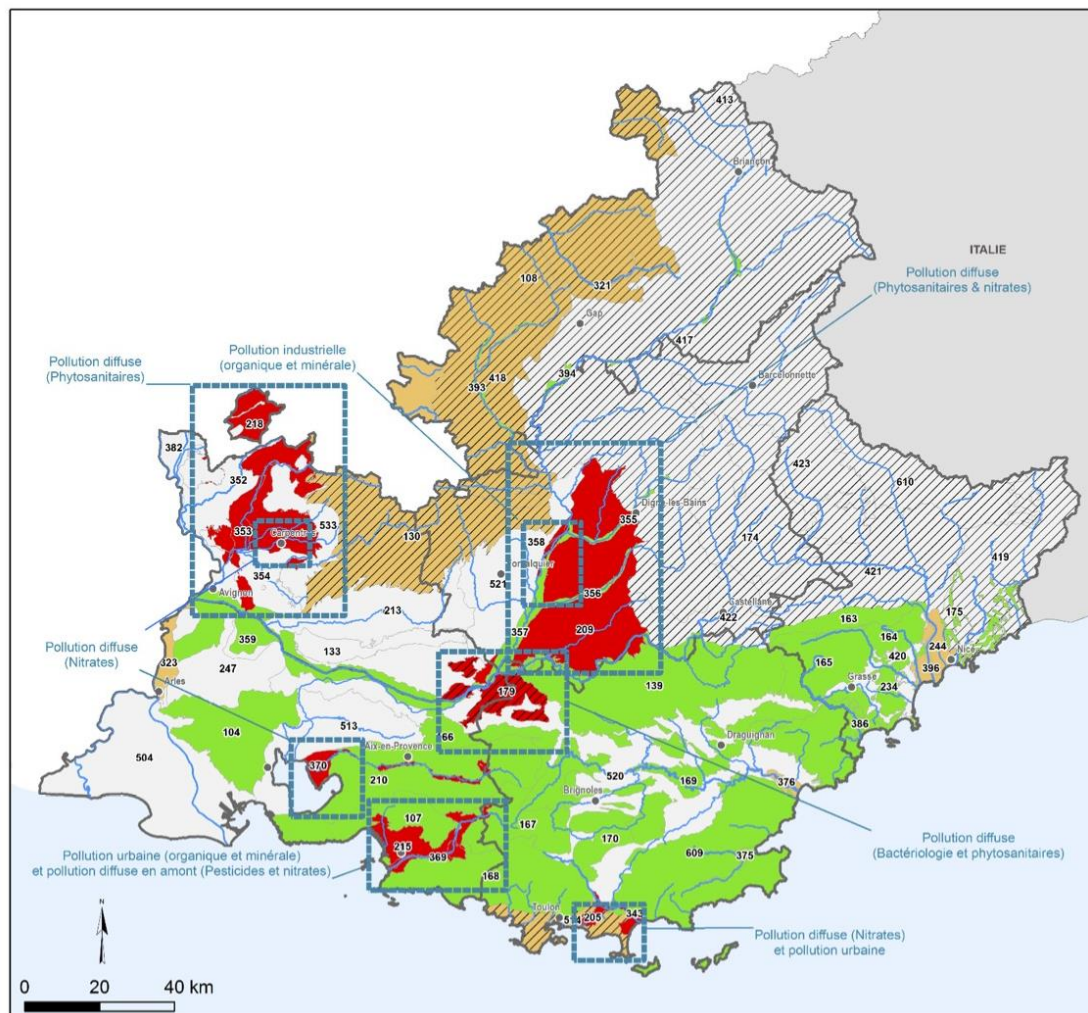
Encadré 1 : Définitions clés pour comprendre les instruments mis en œuvre par la Politique de l'eau	14
Encadré 2: Définitions des concepts clés en agronomie.....	28
Box 1 : Methodology illustrations	70
Encadré 3: Instruction pour la construction et lecture des radars.....	92

ANNEXES

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE 1. CARTE DES MASSES D'EAU SOUTERRAINE AFFLEURANTES EN RÉGION PROVENCE-ALPES-CÔTE-D'AZUR	186
ANNEXE 2. CARTE DES VULNÉRABILITÉS INTRINSÈQUES ET LIMITES DES BAC DE LA PLAINE DES CHÈRES	187
ANNEXE 3. DISPOSITIF D'ENQUÊTE POUR L'ÉTUDE DE L'ADÉQUATION DES MESURES ISSUES DE LA POLITIQUE DE L'EAU AVEC LE FONCTIONNEMENT D'UNE EXPLOITATION AGRICOLE.....	188
ANNEXE 4. PRÉSENTATION DES STRATÉGIES DES AGRICULTEURS DE L'AAC « HIPPODROME »	192
ANNEXE 5. GUIDE D'ENTRETIEN TÉLÉPHONIQUE POUR ÉTUDIER L'ABANDON DES MESURES DE LA DIRECTIVE NITRATES SUITE À L'ARRÊT DE LA RÉGLEMENTATION	193
ANNEXE 6. CALENDRIER DE TRAVAIL AVANT ET APRÈS INSERTION DES PROPOSITIONS DE CHANGEMENT POUR LES QUATRE AGRICULTEURS « TÉMOIN »	194
ANNEXE 7. DÉTAILS DU CALCUL DE L'INDICATEUR INDIGO I_{MO} ET DES RÉFÉRENCES POUR CALCULER LES VARIABLES.....	196
ANNEXE 8. GUIDE MÉTHODOLOGIQUE 1	200
ANNEXE 9. GUIDE MÉTHODOLOGIQUE 2	214

ANNEXE 1. CARTE DES MASSES D'EAU SOUTERRAINE AFFLEURANTES EN RÉGION PROVENCE-ALPES-CÔTE-D'AZUR



Région
Provence-Alpes-Côte d'Azur



Schéma d'orientations pour une utilisation
raisonnée et solidaire de la ressource en eau
SOURCE

Stratégie régionale sur les Eaux Souterraines

Carte 6a
QUALIFICATION DE LA QUALITÉ DES EAUX
CONCERNANT LES
MASSES D'EAU SOUTERRAINE AFFLEURANTES

104 : Code V2 de la MESO (=FRDG104)

- Risque de pollution bactériologique récurrente
- Qualité de l'eau bonne
- Qualité de l'eau moyenne
- Qualité de l'eau mauvaise
- Qualité de l'eau non déterminée

Référentiel masses d'eau souterraines SDAGE 2016-2021

- Réseau hydrographique (BD Carthage, 2007)
- Départements
- Villes principales



BRGM PACA - avril 2015

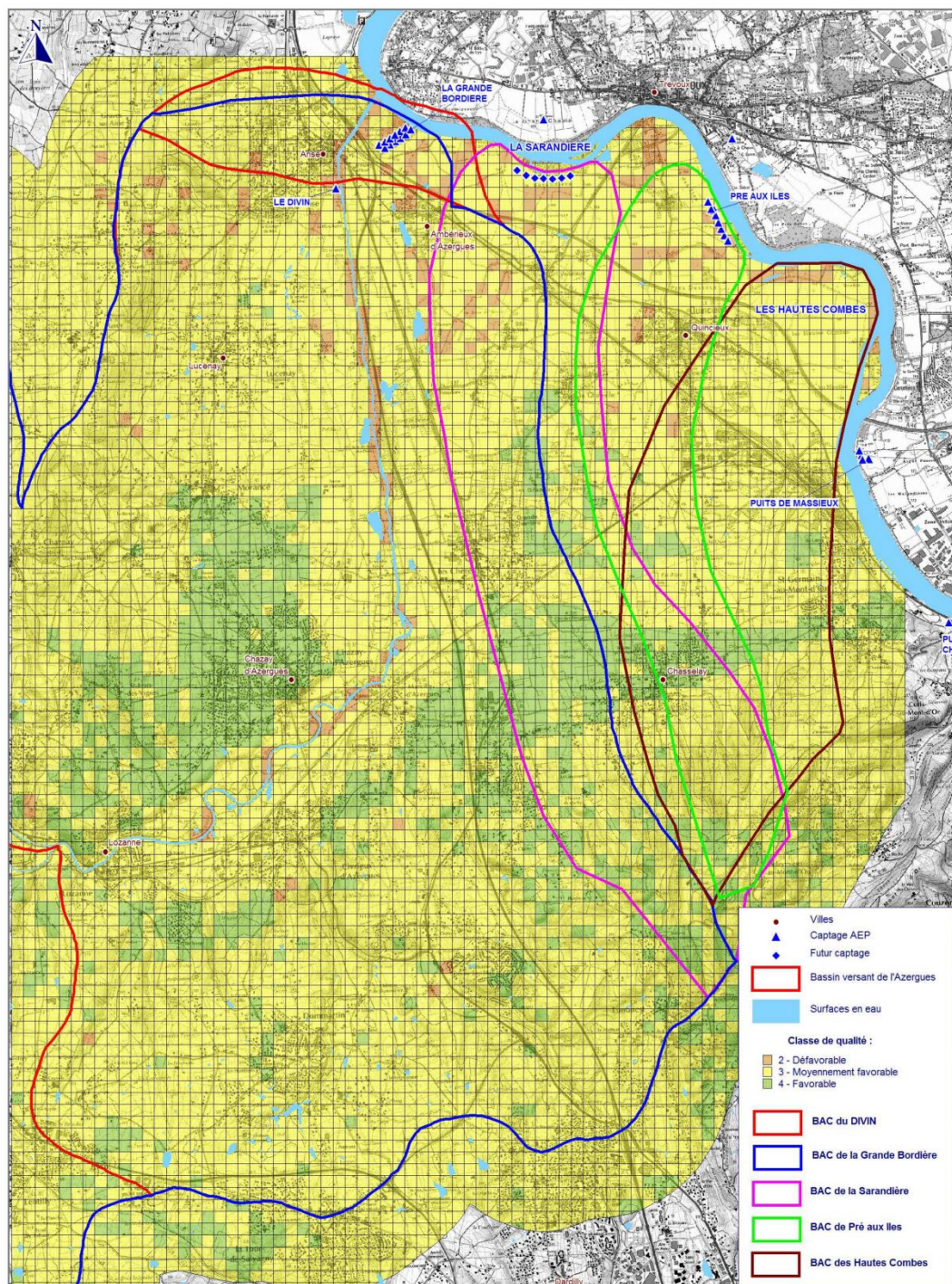
ANNEXE 2. CARTE DES VULNÉRABILITÉS INTRINSÈQUES ET LIMITES DES BAC DE LA PLAINES DES CHÈRES

SMEP Saône-Turdine

Etude de délimitation des Aires d'Alimentation des Captages du SMEP Saône-Turdine (69)

Phase 3 : Analyse Multicritères

VULNERABILITES INTRINSEQUES ET LIMITES DES BAC



ANNEXE 3. DISPOSITIF D'ENQUÊTE POUR L'ÉTUDE DE L'ADÉQUATION DES MESURES ISSUES DE LA POLITIQUE DE L'EAU AVEC LE FONCTIONNEMENT D'UNE EXPLOITATION AGRICOLE

1.1 Conduite des entretiens

Le travail présenté dans ce chapitre 3, s'appuie sur des entretiens conduits en début 2016 auprès d'agriculteurs sur les deux cas d'étude, d'une durée généralement comprise entre 2 et 3h. Cette phase d'enquête a pour objectif de comprendre la façon dont les agriculteurs ont inséré les mesures issues de la réglementation et identifier les modifications aux différents niveaux de gestion leurs exploitations issues de cette implémentation.

Le premier travail consiste à identifier le contexte réglementaire et le contenu des mesures proposées ou imposées aux agriculteurs. Cette étape préalable aux enquêtes comprend des entretiens téléphoniques, parfois en tête-à-tête, avec des acteurs de l'eau afin de révéler le contexte territorial et réglementaire du terrain d'étude. Le second travail consiste à préparer le guide d'entretien. Ce guide se compose de deux parties :

1. La première partie est axée sur le fonctionnement d'ensemble actuel de l'exploitation agricole et basée sur le « Guide d'étude de l'exploitation agricole à l'usage des agronomes » (Capillon and Manichon, 1991). Cette partie comprend la caractérisation de la combinaison des productions en faisant l'inventaire des productions végétales et animales, leur surface ou quantité de matière, leur valorisation et enfin leur conduite que l'on appelle itinéraire technique pour l'activité grandes cultures. Cette première partie est accompagnée d'une carte du parcellaire. La méthode de zonage à dire d'acteur, ZADA, est mobilisée pour permettre à l'acteur, sur un fond de carte, de décrire le système et spatialiser son discours. Il s'agit d'un outil particulièrement intéressant et très utilisé, en particulier dans les domaines de l'agriculture et du développement (Saqalli et al., 2009). De cette description factuelle de son exploitation agricole, il est important de dégager les choix stratégiques aboutissant à cette combinaison de production. L'exploitant est amené à commenter ces descriptions techniques en identifiant les éléments de cohérence de ses pratiques (Gratecap, 2014).

En ce qui concerne le terrain d'étude de l'AAC Hippodrome, des entretiens auprès des exploitations agricoles du territoire ont été faits en 2014 par un stagiaire de l'ISARA. Une réécoute a permis de relever les informations nécessaires pour établir le fonctionnement d'ensemble de ces exploitations.

2. La deuxième partie est axée sur les changements liés à l'application des mesures issues de la politique de l'eau à tous les niveaux de gestion de l'exploitation agricole. Cette partie s'appuie à la fois sur une frise chronologique afin de repérer les changements dans le temps et sur des fiches par mesures existants sur son territoire. Ces dernières explicitent le contenu de la mesure et liste les questions sur des changements potentiels à tous les niveaux de gestions d'une exploitation, de l'itinéraire technique aux ressources (cf. Figures 1 & 2). Comme pour la partie 1 de l'enquête, il est important de dégager les choix stratégiques aboutissant à ces changements liés à l'insertion des mesures. Des questions spécifiques ont été amenées pour identifier les déterminants de ces changements à chaque niveau d'organisation. Ces déterminants sont soit directement identifiables à partir du discours, soit inférées à partir de ce qui est exprimé.

Tous les entretiens ont été enregistrés et retranscrits, ce qui a permis une première étape de traitement des données présentées par la suite.

FICHE : couverture végétale à l'automne pendant l'interculture

CONDITIONS :

1. L'implantation d'une CIPAN doit être réalisée au plus tard le 10 septembre ou dans les 15 jours suivant la récolte > 31 août. Et ne peut être détruite avant le 1^{er} décembre :
2. les légumineuses pures sont autorisées comme CIPAN sous réserve que la destruction de la CIPAN soit postérieure au 1^{er} mars.

EXCEPTIONS :

1. Pour les îlots culturaux sur lesquels la récolte de la culture principale précédente est postérieure au 10 octobre, la couverture des sols pendant l'**interculture longue** n'est pas obligatoire, sauf derrière maïs grain, tournesol ou sorgho
2. Pour **culture porte-graine** à petite graine et **plantation d'alliacées** (ail et échalote) en semence ou conso nécessitant du travail du sol avant le 01/12, pas obligatoire. La date limite d'implantation de la culture est 15/02.
3. Pour **plantation pérenne** nécessitant du travail du sol avant le 01/12 La date limite d'implantation de la culture est 15/03.

CONSTITUTION DES BLOCS DE CULTURE

Avant la réglementation, quelle rotation aviez-vous ? Actuellement, quelle rotation avez-vous ?
 Introduction d'une interculture, laquelle ? Comment avez-vous choisi cette culture ? Depuis quand ? Dans quel objectif (variables de décision) ?
 Avantages/inconvénients de l'interculture ?
 Avez-vous rencontré des difficultés particulières pour introduire cette interculture ?
 Sur quelles parcelles, dans quelles rotations ? Pourquoi ?

CONSTITUTION DES ITK

Quand est-ce que vous semez cette interculture ? Densité de semis ? Variétés résistantes ? L'origine des **semences** ?
 Prix des semences ? Quel est le travail du sol ?

Irrigation

Nouvel aménagement pour l'irrigation ? Si oui, lesquels ? Est-ce qu'il y a un coût supplémentaire pour l'irrigation ?
 Arbitrage avec d'autres cultures ? Temps nécessaire pour le chantier ?

Produits phytosanitaires

Quel PP utilisez-vous pour cette interculture ? Pour quels travaux (destruction ?)

EFFETS SUR D'AUTRE CULTURE

Avez-vous diminué l'apport azoté pour la culture suivante ?
 Avez-vous changé de type de fertilisant depuis que vous mettez l'interculture ? Quand et fréquence ?
 Effets sur les autres cultures de la rotation ? (ex : diminution des herbicides pour la culture suivante car coupe le cycle des ravageurs...)

ORGANISATION DU TRAVAIL

Est-ce que les dates des chantiers pour insérer cette interculture rentrent en compétition avec les autres ateliers de votre EA ? Quelle est la période de pic de travail pour cette interculture ?

MATERIEL

Avez-vous acquis un nouveau matériel pour réaliser l'ITK de cette interculture ?
 Si non, comment vous êtes-vous procuré l'équipement adéquat ? Pour quel(s) travaux (récolte, semis...) ?

Figure 1: Exemple de supports de la partie 2 de l'enquête : la fiche d'une mesure

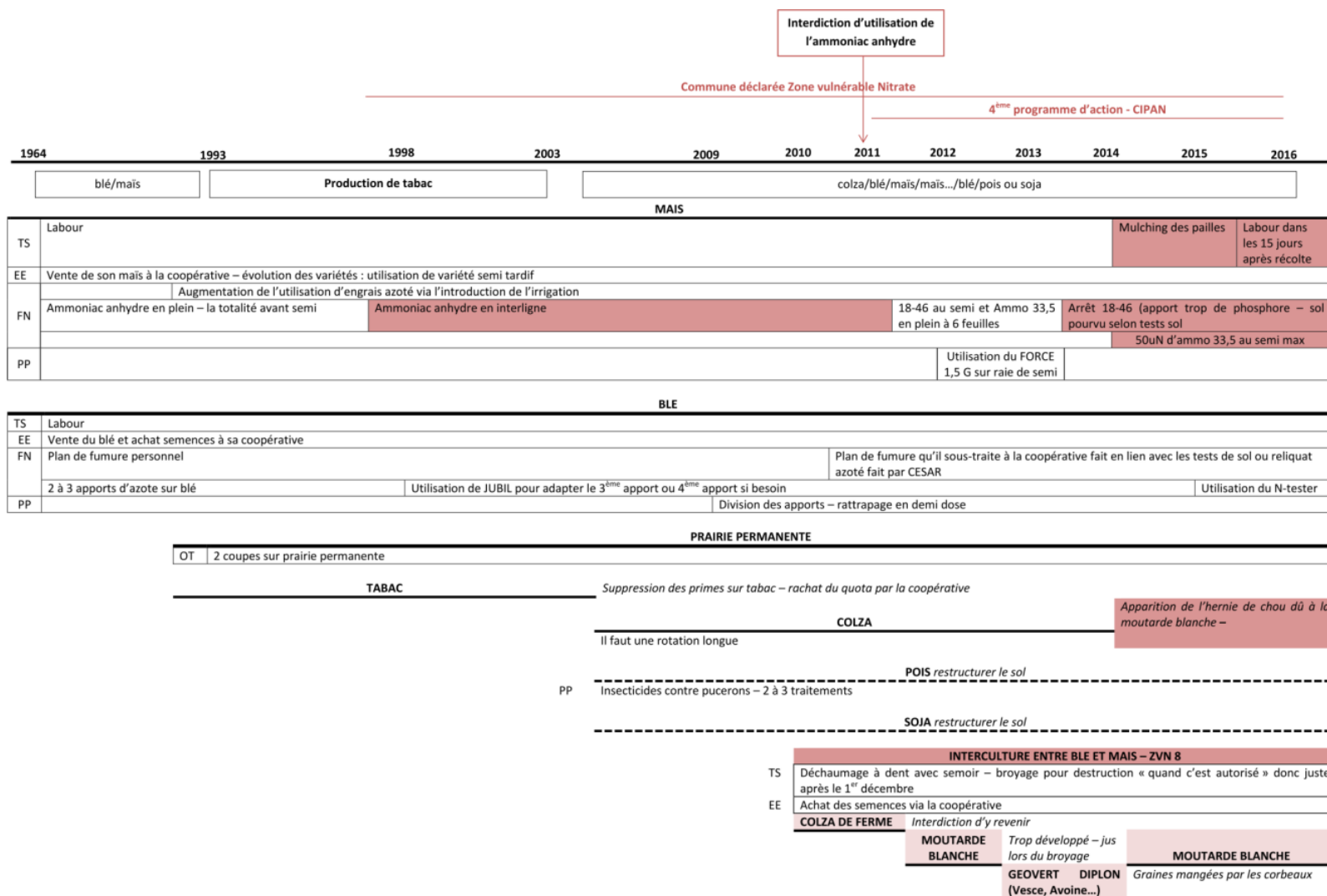


Figure 2: Exemple de supports de la partie 2 de l'enquête : la frise

1.2 Méthodes d'analyse des entretiens

Cette partie présente la méthode d'analyse des changements de pratiques d'agriculteurs liés à l'insertion des mesures, phase de traitement des données préalable à l'analyse de l'adéquation de ces mesures avec le fonctionnement des exploitations agricoles enquêtées.

Cette première phase de traitement s'appuie sur l'analyse des changements à l'échelle de l'exploitation agricole et leurs déterminants. Après retranscription des entretiens, on a analysé à l'aide d'une grille de lecture. Elle détaille par mesure les changements issus de son insertion pour un ensemble de variables structurant les différents niveaux d'organisation de l'exploitation agricole (Combinaison de cultures, semis, niveau de fertilisation, traitement en pesticides, irrigation, matériels) et les cohérences de ces changements avec les objectifs de production de l'agriculteur relevés lors de l'entretien.

Tableau 1: Grille d'analyse des données d'entretien

IMPACTS SUR LES DIFFERENTS NIVEAUX D'ORGANISATION DE L'EXPLOITATION AGRICOLE A1	
Niveau de l'EA	Changement associé à l'application de la mesure
combinaison des cultures	Abandon du colza dans la rotation car pression de l'hernie du chou avec le CIPAN moutarde (2 crucifères)
Semis	Achat des semences de moutarde
Niveau de fertilisation	Pas d'apport d'N sur couvert
Traitement en pesticides	Pas de traitements pesticides
Irrigation	Pas d'irrigation en plus
Travail du sol	Déchaumage
organisation du travail (MO, concurrence...)	Pas de MO en plus mais travail supplémentaire pour le déchaumage, le semi ensuite le broyage et/ou labour pour détruire le couvert
matériels, équipement, bâtiments	Achat individuel d'un semoir à graines grasses pour la moutarde
Environnement socio-économique	Achat des semences de moutarde auprès de la coopérative locale
COHERENCES AVEC SES OBJECTIFS DE PRODUCTION	
Diminution des charges	Achat du matériel + semences de moutarde tous les ans + gasoil dépensé pour déchaumer et broyer
rigueur du travail	La moutarde bloque la broyeuse quand trop développé – difficile de faire du travail « bien fait »
Diminution du temps de travail	Pas d'impact car sous-traite ses semis depuis sa retraite.

ANNEXE 4. PRÉSENTATION DES STRATÉGIES DES AGRICULTEURS DE L'AAC « HIPPODROME »

Au sein de la performance économique, on a distingué l'objectif diminution des charges et celui d'augmentation de la marge brute car ils permettent d'expliquer différentes façons d'implémenter une mesure. Par exemple, O1 laisse les repousses lorsqu'il suit la mesure *Couvert*, en cohérence avec sa stratégie de diminution des charges tandis qu'O2 met déjà des légumineuses en interculture pour gagner des unités d'azote au printemps et augmenter sa marge brute sur l'hectare du blé. De même que pour la performance agronomique, on a distingué l'objectif d'optimisation agronomique pour ce terrain. Enfin, on entend par performance sociale, la diminution et/ou meilleure répartition du temps de travail. Ces six objectifs sont présentés ci-dessous et illustrés par des pratiques types attribués aux agriculteurs interviewés.

Tableau 2 : Sept types d'objectifs pour les agriculteurs de la zone sur cette AAC. Chaque type est décrit par des verbatim ou pratiques relevés durant les entretiens

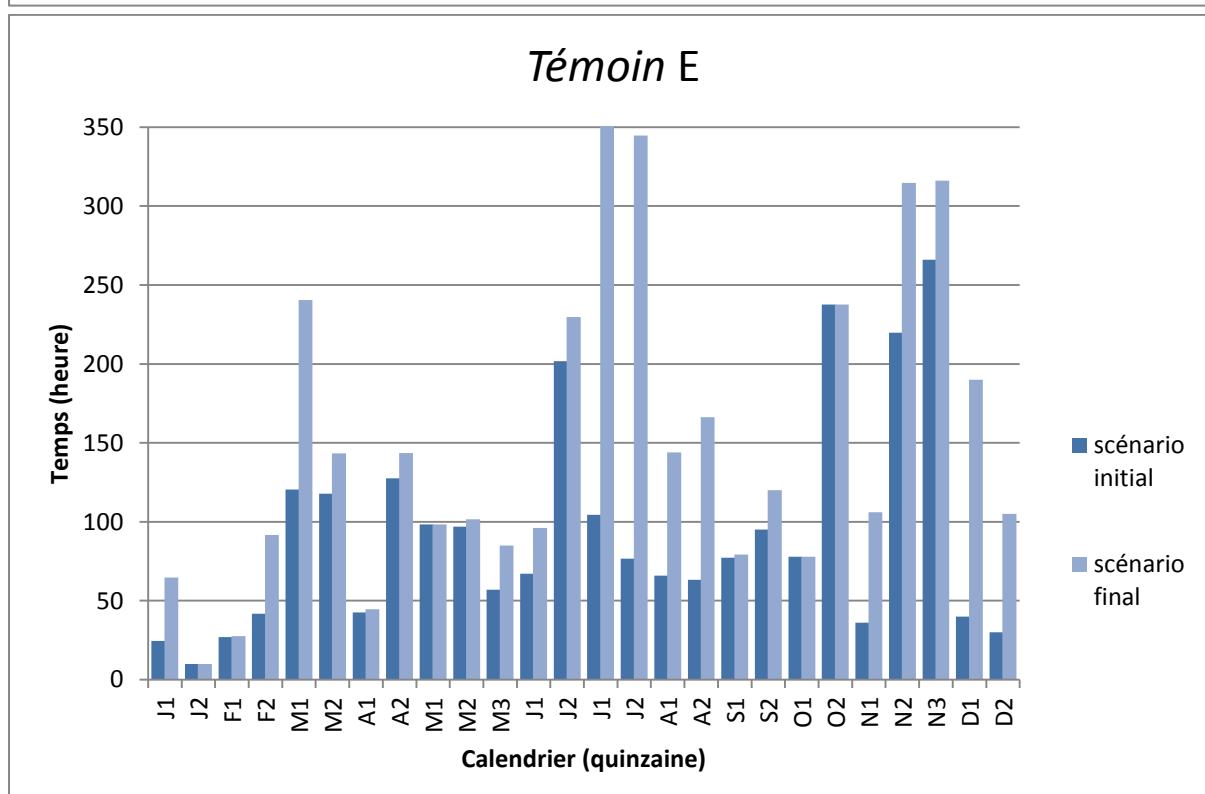
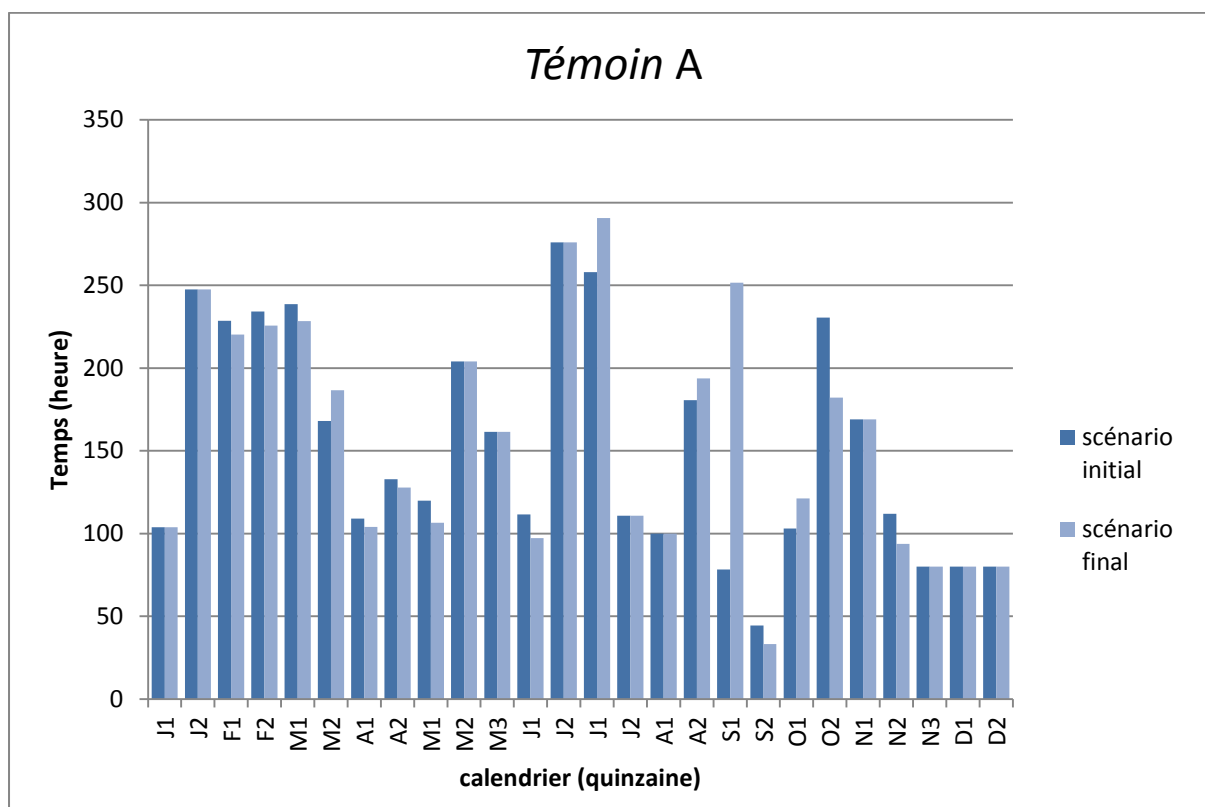
STRATEGIE		Pratiques types attribués aux agriculteurs interviewés
ECONOMIQUE	A. Réduction des coûts	- Substitution de cultures qui demandent moins d'intrants donc moins de charges – O3 - Etre auto-suffisant pour l'alimentation de ses animaux – O7 - Production de ses propres semences – O2; O4; O5 - Semer les fonds de sac pour l'interculture – O1 - Diminuer les intrants chimiques et azotes – O6
	B. Augmentation de la Marge Brute	- Cultiver des cultures de semence et autres cultures à hautes valeurs ajoutées – O2; O3; O4; O6; O8
AGRONOMIQUE	C. Optimisation agronomique	- Semi direct – O2; O4; O5 - Etre plus précis sur la fertilisation et le phénomène de minéralisation – O1
	D. Rigueur technique	Pas d'agriculteurs concernés
E. PERFORMANCE ENVIRONNEMENTALE		- Travailler avec un institut technique pour étudier la diminution des produits chimiques et le sol – O5 - Diminuer l'utilisation des pesticides – O4 - Epandre les pesticides le matin tôt – O2; O3 - Produire du bio – O8
SOCIAL	F. Diminution et/ou meilleure répartition du temps de travail	- Arrêt du labour – O2; O4; O5; O6 - Diversifier les cultures pour répartir le travail - O3; O5 - Arrêter le maïs qui demande trop de travail en période d'irrigation – O8

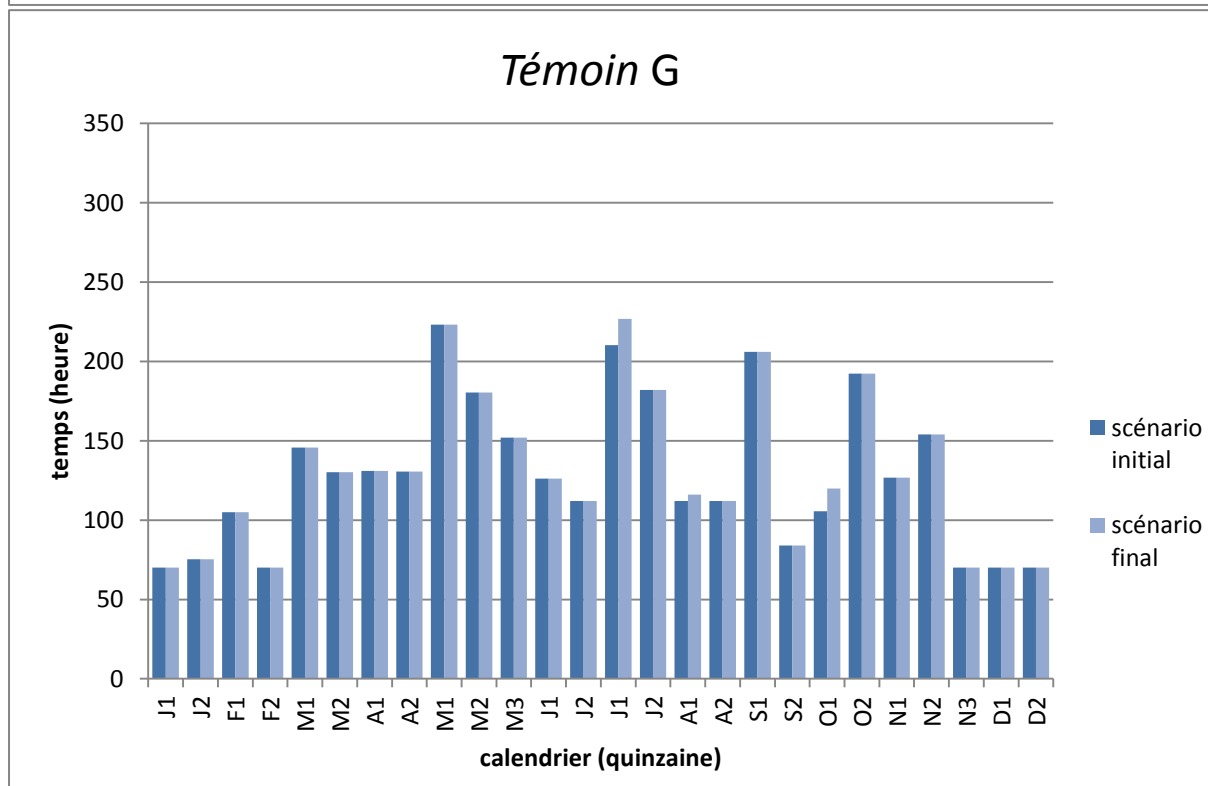
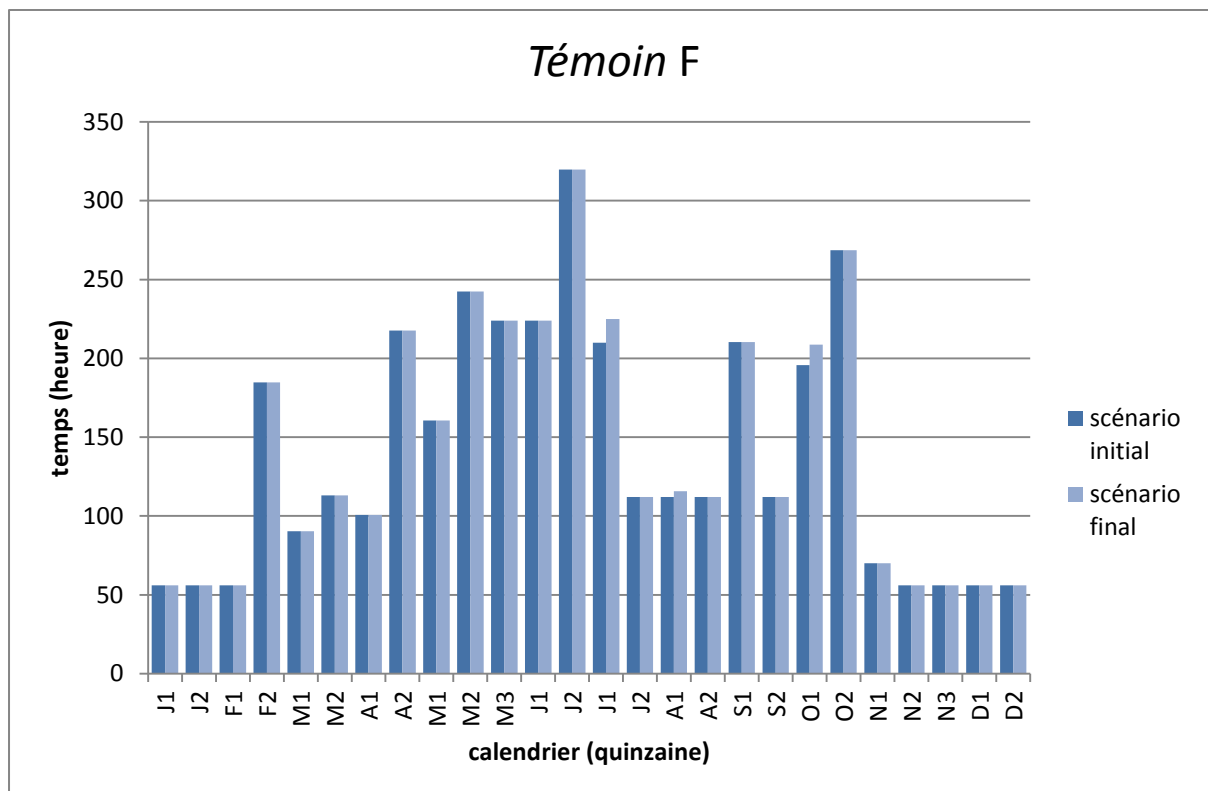
ANNEXE 5. GUIDE D'ENTRETIEN TÉLÉPHONIQUE POUR ÉTUDIER L'ABANDON DES MESURES DE LA DIRECTIVE NITRATES SUITE À L'ARRÊT DE LA RÉGLEMENTATION

Ce guide d'entretien téléphonique présente un tableau qui permet de faire un bilan des mesures qui ont été abandonnées suite à l'arrêt de la désignation en ZVN des deux terrains. Pour cela il est demandé par mesure, si celle-ci sera appliquée de nouveau dans l'exploitation avec une question de relance si nécessaire pour comprendre les raisons de ce maintien ou abandon de la pratique.

MESURES	OUI	NON
Couvert		
Mulch		
Bande		
FertiN		
SoiN		
BalanceN		
Période		
Zone		
Stock		

ANNEXE 6. CALENDRIER DE TRAVAIL AVANT ET APRÈS INSERTION DES PROPOSITIONS DE CHANGEMENT POUR LES QUATRE AGRICULTEURS « TÉMOIN »





ANNEXE 7. DÉTAILS DU CALCUL DE L'INDICATEUR INDIGO I_{MO} ET DES RÉFÉRENCES POUR CALCULER LES VARIABLES

Le calcul de l'indicateur I_{MO} comprend trois étapes de calcul (Bockstaller and Girardin, 2003) :

1) Estimer les facteurs de pondération

$$P = pr \cdot fr \cdot I \cdot TS$$

pr : facteur tenant compte de la profondeur de labour maximale sur 4 ans (pr=profondeur de labour/30)

fr : facteur système de culture

Tableau 3 : Valeurs du facteurs de pondération fr, système de culture (Mary and Guérif, 1994)

Résidus de récolte	Fréquence des apports organiques			
	>10 ans	5 à 10 ans	3 à 5 ans	<3ans
Enlevé ou brûlés	0,8	0,9	1,0	1,1
Enfouis une fois sur deux	0,9	1,0	1,1	1,2
Toujours enfouis	1,0	1,1	1,2	1,3

I : facteur de pondération lié à l'effet de l'irrigation sur la minéralisation. (SI irrigation, I = 1,25)

Ts : facteur prenant en compte l'influence du travail du sol.

TS = 1 (parcelle labourée au moins 1 fois)

TS = 0,8 (absence de labour sur les 4 années et si au moins une fois du travail superficiel)

TS = 0,5 (4 années de semis direct)

2) Calculer A_R

Tableau 4: Valeurs recommandées (AR) en situation normale (à pondérer par le pourcentage de cailloux)

	Classe argile									
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50
2,5 % Calcaire	2840	2078	1595	1311	1156	1088	1082	1100	1135	1166
10 % Calcaire	2563	1875	1439	1183	1043	981	976	992	1024	1052
20 % Calcaire	2267	1659	1273	1046	922	868	864	878	906	930

3) Calcul d' A_x

Calcul des apports d'humus pour les quatre dernières cultures dont les références sont ci-dessous :

Tableau 5 : Valeurs pour les apports en humus (Ax) de certains résidus de culture et amendement organique [a. (Neyroud, 1997) ; b. estimation et c. (Leclerc et al., 1995)]

Céréales														
Rdt q/ha	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	110	115	120
Mg	633	690	748	805	863	920	978	1035	1093	1150	1208	1266	1323	1381
Bh enf	576	628	680	733	785	837	889	942	994	1046				
Bh exp	375	409	444	478	512	546	580	614	648	682				
Maïs ensil.														
Rdt t/ha	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
	175	211	246	281	316	351	386	421	456	491	526	561	596	632
Betteraves														
Rdt t/ha	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105	
	349	388	427	465	504	543	582	620	659	698	737	776	814	
Pois,	600													
Soja^a	500													
Colza	700													
Tourn.^b	700													
Engr. vert	300													
P. de terre	100													
Luzerne^b	750													
Prairie^a	1500													
Fumier^c														
t/ha	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	> 60		
Stab. libre	270	540	810	1080	1350	1620	1890	2160	2430	2700	2970	3240		
Stab.	225	450	675	900	1125	1350	1575	1800	2025	2250	2475	2700		
Entr.														

Références.

- Bockstaller, C., Girardin, P., 2003. Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO. Rapprt Tech. INRA.
- Bolognesi, B., Croullebois, Q., Deneuil, P., Dulos, L., Jourjon, M., Oliveria Rodrigues, G. de, 2012. La Pubérisation à bas Volume (DA AGRECINA - Etudes longues). ISARA-Lyon & Arvalis.
- Leclerc, B., biologique (France), I. technique de l'agriculture, Antoine, D., 1995. Le guide des matières organiques: fertilité des sols, ressources, gestion, fiches techniques. ITAB.
- Lorin, M., Butier, A., Jeuffroy, M.H., Valantin-Morison, M., 2017. Choisir et gérer des légumineuses gélives associées au colza d'hiver pour le contrôle des adventices et la fourniture d'azote. Innov. Agron. 60, 77–89.
- Mary, B., Guérif, J., 1994. Intérêts et limites des modèles de prévision de l'évolution des matières organiques et de l'azote dans le sol. Cah. Agric. 3, 247–257.
- Neyroud, J.A., 1997. La part du sol dans la production intégrée. Rev. Suisse Agric. 29, 45–51.
- Schneider, A., Flénet, F., Dumans, P., Bonnin, E., De Chezelles, E., Jeuffroy, M.-H., Hayer, F., Nemecek, T., Carrouée, B., 2010. Diversifier les rotations céréalières notamment avec du pois et du colza—Données récentes d'expérimentations et d'études. Ol. Corps Gras Lipides 17, 301–311.
- Voisin, A.-S., Cellier, P., Jeuffroy, M.-H., 2015. Fonctionnement de la symbiose fixatrice de N₂ des légumineuses à graines: Impacts agronomiques et environnementaux. Innov. Agron. 43, 139–160.

Tableau 6: Références pour calculer des variables qui permettent d'évaluer l'impact *ex ante* de l'insertion de chaque recommandation

Recommandations	Références pour les hypothèses d'implantation	Hypothèse d'implantation	I _{MO}	Y	CO	CMMO	Prix de vente	WH	QSA	Qf	Nfixé
Couvert gélif entre rang de lavandin	Enquête auprès d'un technicien de l'institut technique sur les plantes aromatiques à parfum CRIEPPAM de la région	Implantation d'un mélange de couvert déjà testé et réussi par un des agriculteurs du plateau. Arrêt du binage et de l'herbicide de rattrapage	INDIGO	n.a	Enquêtes coopératives locales	Données CRITER	n.a	Données CRITER	Enquête auprès du technicien	n.a	Calcul de Boiffin
Insérer la féverole dans la rotation au sec	Références bibliographiques locales et scientifiques	Implantation de 5ha de féverole entre deux blés en conditions optimales	INDIGO	Références bibliographiques ¹	Enquêtes coopératives locales	Données CRITER	Prix mondial	Enquête <i>témoin</i> pour les dates + données CRITER	n.a	Références bibliographiques ¹	Références bibliographiques ²
Colza associé	Enquête auprès des agriculteurs <i>conseillers</i> qui pratiquent le colza associé et références bibliographiques locales	Pas d'impact sur le rendement du colza	INDIGO	n.a	Enquêtes coopératives locales	Données CRITER	n.a	Enquête <i>conseiller</i> pour les dates + données CRITER	Enquête <i>conseiller et</i> références bibliographiques ³	Enquête <i>conseiller et</i> références bibliographiques ³	Références bibliographique ³
Faire du bas volume	Enquête auprès de l'agriculteur <i>conseiller</i> qui pratique le bas-volume et référence bibliographique	Pas d'impact sur les rendements	INDIGO	n.a	Enquêtes coopératives locales	Données CRITER	n.a	Référence bibliographique ⁴	https://ephy.anses.fr/ Référence bibliographique ⁴	n.a	n.a
Faire ses semences de ferme	Enquête auprès de l'agriculteur <i>conseiller</i> qui fait ses semences de ferme et référence bibliographique	Pas d'impact sur les rendements	INDIGO	n.a	Enquêtes coopératives locales et références ⁵	Données CRITER	n.a	Enquête <i>témoin</i>	https://ephy.anses.fr/	n.a	n.a

¹ Perspectives Agricoles, mensuel octobre 2016 « Légumineuses : des plantes aux multiples usages » pour le rendement de féverole et (Schneider et al., 2010) pour le rendement de blé de féverole

² Selon (Voisin et al., 2015)

³ Selon (Lorin et al., 2017)

⁴ Chambre d'Agriculture du Puy de Dôme, 2016 – FICHE TECHNIQUE : Glyphosate, les solutions pour améliorer son utilisation & (Bolognesi et al., 2012)

⁵ <http://www.fsov.org/fsov-source-financement.html>

Implanter pistachier, grenadier, figuier	Références locales des fiches de la chambre d'agriculture PACA et bulletins mensuels du Maroc (même climat) et enquêtes avec le <i>témoin</i>	Toutes les implantations des essences d'arbre réussissent	INDIGO	Références locales	Enquêtes auprès des pépiniéristes et agriculteur <i>témoin</i>	Données CRITER	https://rnm.francagrimer.fr	Références locales et Maroc pour le pistachier	n.a	Enquête <i>témoin</i>	n.a
Implanter du sarrasin en deuxième culture	Enquête auprès de l'agriculteur conseiller qui fait du sarrasin en dérobé et références locales	Rendement moyen sans traitements phytosanitaires et avec une diminution des traitements pour la culture suivante (effet allélopathique du sarrasin)	INDIGO	Enquêtes <i>conseiller</i>	Enquêtes <i>conseiller et coopérative</i>	Données CRITER	Enquête coopérative locale	Enquêtes <i>conseiller</i>	Enquêtes <i>conseiller</i>	Enquêtes <i>conseiller</i>	n.a
Implanter de la féverole en interculture entre maïs	Enquête auprès de l'agriculteur conseiller qui fait du sarrasin en dérobé et références locales		INDIGO	n.a	Enquêtes auprès d'un agriculteur <i>conseiller</i> et de la coopérative locale	Données CRITER	n.a	Enquêtes <i>conseiller</i>	Enquêtes <i>conseiller</i>	Enquêtes <i>conseiller</i>	Références bibliographiques ⁶

Références.

Bolognesi, B., Croullebois, Q., Deneuil, P., Dulos, L., Jourjon, M., Oliveria Rodrigues, G. de, 2012. La Pulbérisation à bas Volume (DA AGRECINA - Etudes longues). ISARA-Lyon & Arvalis.

Leclerc, B., biologique (France), I. technique de l'agriculture, Antoine, D., 1995. Le guide des matières organiques: fertilité des sols, ressources, gestion, fiches techniques. ITAB.

Lorin, M., Butier, A., Jeuffroy, M.H., Valantin-Morison, M., 2017. Choisir et gérer des légumineuses gélives associées au colza d'hiver pour le contrôle des adventices et la fourniture d'azote. Innov. Agron. 60, 77–89.

Voisin, A.-S., Cellier, P., Jeuffroy, M.-H., 2015. Fonctionnement de la symbiose fixatrice de N₂ des légumineuses à graines: Impacts agronomiques et environnementaux. Innov. Agron. 43, 139–160.

⁶ Selon (Voisin et al., 2015)

ANNEXE 8. GUIDE MÉTHODOLOGIQUE 1

Décembre 2017

LIVRABLE 1

Guide méthodologique pour étudier l'adéquation des mesures issues de la Politique de l'eau avec le fonctionnement des exploitations agricole du territoire : Application sur deux zone vulnérables nitrates

| Annabelle Richard
ISARA Lyon, 23 rue Jean Baldassini, 69007 Lyon



1. OBJECTIF DE L'ÉTUDE

En France métropolitaine, la **reconquête et/ou la préservation de la qualité des eaux souterraines** vis-à-vis des pollutions diffuses d'origine agricole est un enjeu majeur. Les dispositifs réglementaires mis en place pour répondre aux problèmes des pollutions diffuses agricoles⁷ entraînent l'écriture d'un programme d'action. Il est le résultat d'un travail itératif de concertation et de collaboration mené au niveau local avec tous les acteurs impliqués dans la gestion de l'eau. Tout programme d'action pour la reconquête de la qualité de la ressource fait l'objet de deux logiques d'intervention :

1. l'une obligatoire, directement adossée à la Directive Nitrates à l'échelle des zones vulnérables ;
2. l'autre, volontaire, reposant sur le conseil et une sensibilisation agricole à l'échelle de territoires plus ciblés (actions Ferti-mieux, Bassin versant, AAC...). Les Mesures Agro Environnementales (MAE), construites autour de ces mêmes principes techniques, viennent proposer un instrument financier au service de cette politique et un levier pour les premières démarches collectives de gestion.

Actuellement ce processus conduit à un ensemble de mesures qui impliquent des changements partiels ayant **une efficacité vis-à-vis de la protection de la qualité des eaux souterraines très hétérogène** selon les captages (Brun, 2003; Menard et al., 2014; Oenema et al., 2009). Cette efficacité partielle peut avoir diverses raisons comme (i) la lenteur du processus liée à la diversité des acteurs en jeu (Brun, 2003), (ii) la faible adoption des mesures volontaires par les agriculteurs (Kuhfuss et al., 2012) et (iii) le contenu peu original et innovant des mesures (Menard et al., 2014).

À travers ces différentes raisons non exhaustives, nous en supposons une autre. Cette faible efficacité pourrait s'expliquer par le fait que ces mesures ne soient **pas adaptées au fonctionnement des exploitations agricoles**. En effet, on suppose que si les mesures ne sont pas adaptées à leur fonctionnement alors elles peuvent soit (i) ne pas être implémentées et du coup inefficaces, soit (ii) être mal implémentées et du coup partiellement efficaces ou enfin (iii) être abandonnées dès que possible (changement/arrêt de la réglementation) et du coup inefficaces dans la durée.

Pour vérifier ces hypothèses, cette étude porte sur **l'analyse de l'implémentation** par les agriculteurs des mesures de la Directive Nitrate et de leurs adéquations avec le fonctionnement de ces exploitations agricoles. Il s'agit pour cela de développer une méthodologie qui permette de scinder divers comportements afin d'orienter la recherche de solutions adaptées aux contraintes et fonctionnement propres à chaque type d'exploitation agricole. Cette analyse porte sur deux zones, soumises à la directive nitrate, présentes sur le bassin Rhône Méditerranée Corse.

2. PRÉSENTATION DES DEUX CAS D'ÉTUDE

Chaque cas d'étude sélectionné représente une zone d'alimentation d'un ou plusieurs captages prioritaires, nommée « **Aire d'Alimentation de Captage** » (AAC), délimitée par un périmètre où toute précipitation est susceptible de parvenir jusqu'au captage. Au sein de cette zone, un programme d'actions est mis en place de façon **volontaire** (sous réserve d'une amélioration de la qualité des eaux) et constitue un support d'**animation technique** sur le territoire. Il peut trouver un appui financier avec les Mesures Agro-Environnementales (MAE) écrits dans le cadre d'un PAEC. Ces deux cas d'étude sont des « **zones vulnérables nitrates** », afin de prévenir et réduire la présence des nitrates d'origine agricole dans les eaux d'alimentation. Les mesures étudiées peuvent être de trois types : (i) celles écrites dans les programmes d'action pour la protection des AAC (à caractère volontaire ou obligatoire en l'absence d'amélioration) (ii) les Mesures Agro-Environnementales, et (iii) celles écrites dans les programmes d'action 'Directive Nitrate' pour les Zones Vulnérables Nitrates à caractère obligatoire.

⁷ Teneur élevée en nitrates (seuil à 50mg/L) et/ou en produits phytosanitaires (seuil à 0,1µg/l et 0,5µg/l pour le total)

Tableau 7 : Présentation des deux Aires d'Alimentation de Captage (*ZIP : Zone d'Intervention Prioritaire)

	Étude de cas 1	Etude de cas 2
	<i>Hippodrome</i>	<i>Plaine de Chères</i>
Nombre de captage(s)	1	3
Origine de la pollution	Nitrate (40mg/L) et pesticides (atrazine)	Nitrate et pesticides (2-4D)
Surface agricole /surface de l'AAC (ha)	263/296	1800/2900
Nombre d'agriculteurs enquêtés/nombre total sur l'AAC ou ZIP*	8/8	14/40
Date de la délimitation de l'AAC	2009	2012
Date du Programme d'Action	2010	2014
Désignation en Zone Vulnérable Nitrate	2012 – fin 2016	1997 ou 2003 – fin 2017

2.1 Le premier cas d'étude : AAC Hippodrome

Le premier cas d'étude se situe en Val de Durance, au nord des villes de Manosque et d'Oraison (cf. annexe 1). Le captage s'appelle 'Hippodrome' et est prioritaire au titre du Grenelle depuis 2009 ; le maître d'ouvrage est la Communauté d'agglomération Durance Luberon Verdon (DLVA) (Tab.1). La production agricole est majoritairement grandes cultures avec comme cultures principales le blé, le maïs et le tournesol. Concernant les produits phytosanitaires, la problématique de l'atrazine a conduit le maître d'ouvrage à mettre en place une usine de traitement de l'eau. D'après le diagnostic des pressions fait en 2009, le problème de Triazine® semble se résoudre mais les molécules qui présentent une mobilité importante, tel que le Glyphosate® et le Diquat® doivent faire l'objet d'une attention particulière. Concernant les nitrates, la nappe est affectée par une contamination chronique en nitrates avec une teneur stable depuis mi-2005 à 40mg/L. Suite à ce diagnostic, une charte a été proposée définissant des actions à caractère volontaire telles que: (i) diversification de l'assolement, (ii) gestion raisonnée des intrants, (iii) mesure des reliquats azotés du sol, (iv) pilotage de la fertilisation azotée sur blé dur, (v) pilotage de la fertilisation azotée sur maïs, (vi) création d'une aire collective de remplissage des pulvérisateurs, (vii) formations à différentes problématiques techniques agricoles.

Les exploitants agricoles qui ont signé cette charte sont actuellement sept parmi les huit qui sont sur l'AAC. La dernière exploitation a été créée après la mise en place de la charte. Les caractéristiques de ces exploitations sont présentées dans l'annexe 3.

Depuis 2012, la commune d'Oraison, présente en partie sur l'AAC Hippodrome, a été désignée comme zone vulnérable nitrate. Les exploitants agricoles de cette commune, dont ceux qui cultivent sur l'AAC Hippodrome, sont donc soumis aux mesures de la directive nitrate (cf. Tab. 3).

2.2 Le deuxième cas d'étude : AAC Plaine des Chères

Le deuxième cas d'étude est l'AAC de la Plaine des Chères située au nord de Lyon sur les communes de Quincieux et d'Ambérieux (annexe 2). Cette AAC est composée de trois captages « Grande Bordière, « Sarrandière » et « Pré aux Iles » qui sont classés prioritaires au titre du SDAGE Rhône Méditerranée et qui doivent donc faire l'objet d'un programme d'action de lutte contre les pollutions diffuses par les nitrates et pesticides ; Ils figurent dans la liste nationale des captages « Grenelle ». L'enjeu de reconquête et de protection de la qualité de ces captages est fort sachant qu'ils alimentent en eau potable 110 000 usagers. Un diagnostic des pressions a été établi par le bureau d'étude TAUW et un Programme d'Action a été défini par le maître d'ouvrage : le Syndicat Mixte d'Eau Potable (SMEP) Saône-Turdine. Actuellement, les exploitants agricoles rencontrés n'ont pas ou peu connaissance des mesures écrites dans le cadre du programme d'action (qui ne

sont pas obligatoires). Cette zone est soumise à un PAEC Val de Saône, les exploitants agricoles de la zone rapprochée peuvent donc souscrire à des Mesures agro-environnementales⁸ (MAE) depuis 2014, et six d'entre eux les appliquent. Les communes de l'AAC sont en zone vulnérable nitrate et par conséquent les quatorze agriculteurs rencontrés sont tous soumis au 5^{ème} programme d'action (cf. Tab. 3.). Les agriculteurs sont majoritairement en grandes cultures et cultivent sur la zone du périmètre de protection rapprochée (Annexe 3).

Tableau 8 : Présentation des mesures réglementaires issues de la Directive Nitrate et de la charte d'Oraison (*mesures appliquées seulement par les agriculteurs de l'AAC de l'Hippodrome d'Oraison)

Code	Mesures étudiées	Contenu spécifique des mesures par terrain d'étude	
		AAC Hippodrome	AAC Plaine des Chères
Couvert	Couvrir ses sols en interculture	Les parcelles doivent être couvertes en hiver après une récolte avant le 1 ^{er} octobre.	
Mulch	Couvrir ses sols en interculture	Broyage et enfouissement superficiel ou profond des résidus de maïs, tournesol et sorgho dans les 15 jours suivant la récolte	
Bande	Planter une bande enherbée en bord de cours d'eaux	Bande enherbée de 5 mètres doit être implantée le long des cours d'eau représentés par des traits pleins et pointillés nommés sur carte IGN et des plans d'eau sur IGN	
PlanN	Enregistrer ses pratiques	Tenue obligatoire d'un Plan Prévisionnel de Fertilisation et d'un cahier d'enregistrement des pratiques	
Reliquat	Equilibrer sa fertilisation	Réaliser une analyse de sol ou reliquat azoté sortie hiver par an pour toute exploitation ayant plus de 3ha en zone vulnérable nitrate	
FertiN	Equilibrer sa fertilisation	Les apports doivent être strictement équilibrés avec les besoins culturaux et la quantité d'azote épandable par les effluents d'élevage est de 170kg N tot/ha/an maximum	
Période	Respecter les périodes d'interdiction d'épandage	Interdiction d'épandre avant le 15.01 pour les cultures implantées à l'automne ou fin d'été	Interdiction d'épandre avant le 31.01 pour les cultures implantées à l'automne ou fin d'été
Stockage	Avoir un stockage adapté aux effluents	Pas d'élevage	Changer le lieu de stockage sur les parcelles et avoir une capacité de stockage à définir selon UGB...
Zone	Respecter les conditions d'épandage	Pas de zone de périmètre de protection rapprochée autour du captage	Ne pas épandre d'effluents d'élevage sur parcelles en zone rapprochée

On distingue parmi ces neuf mesures, trois catégories : (i) les mesures qui suivent une **logique de couverture des sols** (Couvert, Mulch, Bande) ; (ii) les mesures qui permettent un **meilleur raisonnement de la fertilisation** (PlanN, Reliquat, FertiN) et enfin (iii) les mesures qui ont des **restrictions spatiales** (Zone, Stock) **et temporelles** (Période).

3. MÉTHODOLOGIE D'ÉVALUATION À L'ÉCHELLE DE L'EXPLOITATION AGRICOLE

On fait l'hypothèse que l'**adéquation** d'une mesure avec le fonctionnement d'une exploitation agricole peut se mesurer par **les modifications** issues de son insertion sur le fonctionnement de l'exploitation agricole. Selon Aubry et Michel-Dounias (in Doré et al. 2006), les évolutions que connaît toute exploitation agricole sont liées à la fois aux **modifications stratégiques** et **structurelles**.

⁸ Réduction progressive des herbicides (25 ou 50%), Réduction progressive des produits hors herbicides (20 ou 40%), Lutte biologique (trichogramme), Remise en herbe (ilots stratégiques)

Nous avons identifié et suivi différentes étapes pour juger de l'adéquation des mesures réglementaires de protection de la qualité des eaux souterraines avec le fonctionnement de l'exploitation. En voici les cinq étapes principales (cf. fig. 1) :



Figure 3 : étapes clés pour évaluer l'adéquation des mesures de la politique de l'eau avec le fonctionnement d'une exploitation agricole

1. Distinguer les différentes façons dont les agriculteurs ont **inséré les mesures réglementaires proposées** dans leurs exploitations agricoles, autrement dit la **traduction des mesures en pratiques**.
2. Classer les **niveaux d'impact structurel** qu'implique l'insertion de la mesure traduite et qui définit sa **modification structurelle**. On a distingué trois niveaux d'impact (cf. Tab 3)
3. Qualifier la **cohérence** de cette mesure traduite **avec les objectifs de l'exploitant** qui définissent les décisions d'orientation stratégique de l'exploitation. On a défini trois niveaux de cohérence suivant les bénéfices agronomique, économique et social apportés après insertion de la mesure (cf. Tab 3). Nous avons privilégié la cohérence agronomique qui suit des critères stables (état du sol, potentiel de rendement....) contrairement à la cohérence économique (prix de vente, coût des produits...).
4. Caractériser **l'adéquation des mesures** avec le fonctionnement global de l'exploitation agricole en croisant les modifications structurelles et la cohérence stratégique. On distingue quatre niveaux d'adéquation de forte à très faible (cf. Tab 3)

Ces quatre étapes permettent d'établir une typologie des exploitations agricoles en fonction de l'adéquation des mesures avec le fonctionnement global de leur exploitation.

Tableau 9 : Cadre d'analyse pour évaluer l'adéquation d'une mesure implémentée avec le fonctionnement d'une exploitation agricole

COHERENCE STRATEGIQUE IMPACT STRUCTUREL	FORTE	MODESTE	FRAGILE
	(car suit une logique agronomique et économique/sociale selon l'agriculteur)	(car suit une logique agronomique mais non économique/sociale selon l'agriculteur)	(car est agronomiquement incohérent selon l'agriculteur)
NUL : Pas concernée	AUCUNE		
LEGER pas de changement ou changement de l'environnement socio-économique et/ou des pratiques agricoles	FORTE	MODEREE	FAIBLE
CONSIDERABLE Changement de système de culture et/ou des ressources matérielles et humaines	MODEREE	FAIBLE	TRES FAIBLE

4. RÉSULTATS

4.1 Diversité d'implémentation des mesures de la Directive Nitrate et les déterminants

On peut observer une grande diversité d'implémentation des mesures de la directive nitrate par les 22 exploitants agricoles (Tab. 4). Pour les mesures Couvert, Mulch, FertiN et Période, les agriculteurs les ont implémentés de 4 à 7 façons. Tandis que pour les mesures Bande, PlanN, solN, Stock et Zone, il y a 2 à 3 façons développées.

Tableau 10 : Les différentes implémentations des neuf mesures de la Directive Nitrate par les 22 exploitations agricoles enquêtées

	EA concernés (/22)			
	Cas 1 (/8)	Cas 2 (/14)	Total (%)	
Traduction des mesures de la directive nitrate				
Couvert	Implantation d'une moutarde blanche et achat d'un semoir CIPAN	1	5	
	Implantation d'un mélange restructurant (avoine, vesce, radis..) et achat d'un semoir partagé	2	9	
	Implantation d'une moutarde blanche	2	9	
	Implantation d'un mélange restructurant (avoine, vesce, radis/ couvert de chasse..)	3	13	
	Implantation du colza de ferme ou d'un mélange des semences de fonds de sac ou repousses	2	1	13
	Implantation de l'avoine brésilienne / sainfoin / vesce / soja dérobé	1		5
	Pas d'implantation d'interculture		1	5
<i>Pas de changement (déjà recours au couvert) / non concerné (pas de rotation avec une période d'interculture)</i>				
Mulch	Labour dans les 15 jours après la récolte	1	5	
	Mulching des cannes de maïs	1	8	41
	Pas de mulching en implantant du blé directement après la récolte de maïs		2	9
	Mulching des cannes de maïs sur sol limoneux et labour dans les 15 jours après la récolte sur sol argileux		1	5
<i>Pas de changement (déjà recours au mulching) / non concerné (pas de maïs/tournesol)</i>				
Ban	Installation d'une bande enherbée de 5 mètres	9	41	
	Bande enherbée de 5 m & 10m mètres	1	5	

	<i>Pas de changement (bande enherbée déjà implantée) / non concerné (pas de cours d'eau au bord des parcelles)</i>	8	4	54
PlanN	Sous-traitance du plan de fumure	1	5	27
	Constitution de son propre plan de fumure	7	4	50
	<i>Pas de changement (déjà recours à un plan de fumure)</i>		5	23
SolN	Achat d'une analyse de sol par an		7	32
	Achat de plusieurs analyses de sol par an		5	23
	Achat d'un reliquat azote par an	6		27
	<i>Pas de changement (déjà recours à des tests sol)</i>	2	2	18
FertiN	Diminution de la quantité d'azote	4	6	49
	Diminution de la quantité d'azote et fractionnement de l'azote	1	4	23
	Diminution de la quantité d'azote et compensation de la limite d'épandage du fumier avec de l'azote minéral		1	5
	Apport d'engrais de fond complet et limitation à 50uN sur maïs		2	9
	<i>Pas de changement (déjà à la limite d'apport de fertilisants)</i>	3	1	14
Période	Retardement de l'épandage du lisier et fumier après le 31.01		2	9
	Changement la culture sur laquelle épandre le fumier et lisier		1	5
	Substitution du fumier par de l'engrais de fond		1	5
	Substitution du blé par l'orge & arrêt du premier apport d'azote sur blé avec compensation sur le 2ème apport		1	5
	Retardement du 1er apport d'azote sur blé et compensation sur sa quantité	2		9
	<i>Pas de changement (épandage déjà hors des périodes d'interdiction) / non concerné (pas d'atelier grandes cultures)</i>	6	9	67
Stock	Construction d'une fumière et changement de lieu de stockage		1	5
	Changement de lieu de stockage		2	9
	<i>Non concerné (pas d'élevage)</i>	8	11	86
Zone	Arrêt d'épandage de fertilisants organiques en parcelles sur le périmètre de protection rapprochée		1	5
	<i>Pas de changement (n'épandait déjà pas sur la zone) / non concerné (pas de parcelles sur la zone)</i>	8	13	95

On peut noter une forte variabilité du nombre d'agriculteurs concernés par l'implémentation de la mesure sélectionnée. L'implémentation des mesures sur la couverture des sols impliquent un changement pour un peu plus de la moitié des 22 agriculteurs. Les mesures de gestion de la fertilisation impliquent eux un changement pour au moins 80% des agriculteurs. L'implémentation des mesures à restriction spatio-temporelle, Période, Stock et Zone, implique un changement pour maximum 7 agriculteurs. Cette variabilité observée peut s'expliquer par différents déterminants explicités ultérieurement.

4.1.1 Déterminants agronomiques et climatiques

L'implémentation des mesures de la Directive Nitrate varie en fonction des caractéristiques agronomiques et des conditions climatiques. Par exemple, la texture du sol (argileux ou limoneux) est déterminante pour l'implémentation de la mesure Mulch. Les cannes de maïs ou tournesol broyées dans un sol argileux après une pluie transforme le sol boueux et rend impossible le labour. Enfin, faire un mulching dans un sol argileux par un temps sec est quasiment impossible du fait de la dureté du sol. Cette obligation de moyen « faire un mulch » ne prend pas en compte la diversité des caractéristiques agronomiques des exploitations et de la variabilité des conditions climatiques qui a pour conséquence une implémentation partiellement efficace vis-à-vis de l'enjeu eau (ex : labour dans les 15 jours après récolte afin d'éviter le phénomène de boue).

4.1.2 Déterminants liés au territoire

En comparant les deux zones d'étude, on a pu observer que l'implémentation des mesures de la Directive Nitrate varie en fonction de l'environnement socio-économique. En effet, sur le terrain 1, AAC Hippodrome,

aucun technicien n'est référent sur la zone malgré la présence de deux entreprises de collecte. Par conséquent, les agriculteurs font leur propre plan de fumure sur un tableau Excel développé par un des agriculteurs sans prendre en compte les recommandations proposées par le plan de fumure (cf. Tab 4). Tandis que sur le terrain 2, AAC Plaine des chères, il y a une coopérative omniprésente qui propose un service de sous-traitance du plan de fumure proposée depuis 1997. Ainsi, le plan de fumure est rentré dans la pratique des agriculteurs de la zone qui suivent les recommandations et ont diminué la quantité de fertilisants épandus, une implémentation optimale de cette mesure pour intervenir sur la qualité des eaux souterraines (cf. Tab 4).

4.1.3 Déterminants liés à la stratégie et la structure de l'exploitation

L'implémentation des mesures de la Directive Nitrate varie en fonction de l'organisation d'une exploitation agricole, impliquant sa structure et sa stratégie. L'exemple le plus marquant est la diversité d'implémentation de la mesure Couvert. Planter une moutarde accompagné de l'achat d'un semoir adapté suit une logique de rigueur technique afin de couvrir le sol rapidement et de façon homogène. Planter un mélange comme l'avoine, la vesce et le radis fourrager suit une logique de performance agronomique afin d'apporter de la matière organique au sol et de le restructurer. Enfin, planter des fonds de sac et laisser les repousses suit une logique de diminution des charges afin d'être dans les règles à moindre coût. Ces différentes stratégies expliquent donc que cette obligation de moyen « planter un couvert » peut être implémentation de diverses manières en intervenant de façon plus ou moins significative sur la qualité des eaux souterraines.

Ces déterminants qui permettent d'expliquer la diversité d'implémentation des mesures de la Directive Nitrate permettent notamment d'expliquer la variabilité d'adéquation d'une mesure pour les 22 exploitants agricoles, présentée ci-dessous (Tab. 5).

4.2 Adéquation des mesures implémentées avec le fonctionnement des exploitations agricoles

Tableau 11 : Résultat de l'adéquation des neuf mesures de la directive nitrates avec le fonctionnement des 22 exploitations agricoles enquêtées

EA	Couvert	Mulch	Bande	PlanF	SoIN	FertiN	Période	Stock	Zone	Type
A4	Forte	Faible	Forte	Forte	Forte	Forte	Forte	NC	NC	I
A9	Forte	Mod.	Mod.	Forte	Forte	Forte	Forte	NC	NC	
A2	Forte	Faible	Forte	Faible	Forte	Faible	Mod.	Forte	NC	
A14	Mod.	Mod.	Forte	Mod.	Forte	Faible	Forte	NC	NC	
A11	NC	NC	NC	Forte	Faible	Mod.	Mod.	NC	NC	
O5	Forte	Faible	NC	Faible	Mod.	Forte	Mod.	NC	NC	
O7	Faible	NC	NC	Faible	Faible	Mod.	Mod.	NC	NC	
O8	NC	NC	NC	Faible	Mod.	Mod.	Forte	NC	NC	
A7	Mod.	Faible	NC	Forte	Forte	Forte	Mod.	Mod.	Mod.	II
A8	Forte	Faible	Mod.	Faible	Faible	Mod.	Mod.	NC	NC	
A6	Faible	Faible	Faible	Forte	Forte	Mod.	Forte	NC	NC	
A10	Faible	Faible	NC	Faible	Faible	Forte	Mod.	Mod.	NC	
O2	Forte	NC	NC	Faible	Mod.	Mod.	Faible	NC	NC	
O4	Forte	Faible	NC	Faible	Faible	Forte	Faible	NC	NC	
A12	Très faible	Faible	Forte	Forte	Mod.	Mod.	Mod.	NC	NC	III
A1	Très faible	Faible	Mod.	Forte	Mod.	Faible	Mod.	NC	NC	
A5	Très faible	Mod.	Faible	Mod.	Faible	Forte	Mod.	NC	Très faible	
A13	Faible	Faible	Faible	Mod.	Faible	Faible	Très faible	Mod.	NC	
A3	Très faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Faible	Très faible	Faible	Faible	
O1	Très faible	Mod.	Mod.	Faible	Faible	Forte	Mod.	NC	NC	
O3	Très faible	Très faible	NC	Faible	Faible	Forte	Très faible	NC	NC	
O6	Très faible	Très faible	NC	Faible	Faible	Forte	Mod.	NC	NC	

On constate que les mesures de couvertures des sols peuvent avoir une faible à très faible adéquation avec les agriculteurs. Certains agriculteurs ne perçoivent pas les bénéfices agronomiques de ces mesures qui leur sont imposées et qui augmentent leurs charges. En ce qui concerne les mesures de gestion de la fertilisation, le plan

de fumure est une mesure mal appliquée surtout pour les agriculteurs du terrain 1 qui ne suivent pas les recommandations du plan de fumure. Pour les tests sol ou reliquat azoté, certains agriculteurs, en observant le résultat de leur sol se rendent compte de l'intérêt de cette analyse. D'une opinion négative de cette mesure, ces deux agriculteurs y voient ensuite une cohérence agronomique et devient donc modérément adéquate avec le fonctionnement de leur exploitation (cf. Tab 5 : O5 & O8).

A partir de ces résultats, nous avons établi une typologie qui permet de constituer des groupes d'agriculteurs. Par type d'exploitation, des recommandations seront proposées afin d'améliorer l'adéquation des mesures avec leur fonctionnement et donc potentiellement leurs implémentations pour protéger durablement la qualité des eaux souterraines.

4.3 Typologie des exploitations agricoles et recommandations

4.3.1 Type 1 : forte adéquation

Huit exploitants sont de type I et ont un fonctionnement leur permettant d'adopter facilement les mesures de la Directive Nitrates (cf. Tab 5). Ces exploitations ont majoritairement un seul atelier grandes cultures soumis à une stratégie globale en accord avec celle de protéger la qualité des eaux souterraines (cf. figure 2). Leur stratégie explique cette adéquation des mesures avec le fonctionnement de leurs exploitations. Les autres exploitations ont une activité agricole ou non-agricole en parallèle de celle des grandes cultures qui représente une place importante d'un point de vue économique. Cette importance lucrative explique que ces agriculteurs investissent peu de temps ni d'argent à l'atelier grandes cultures, limitant l'apport d'intrants. Pour ces agriculteurs, l'implémentation des mesures semble optimale pour protéger et reconquérir la qualité des eaux souterraines. Aucune recommandation supplémentaire n'est donc proposée.

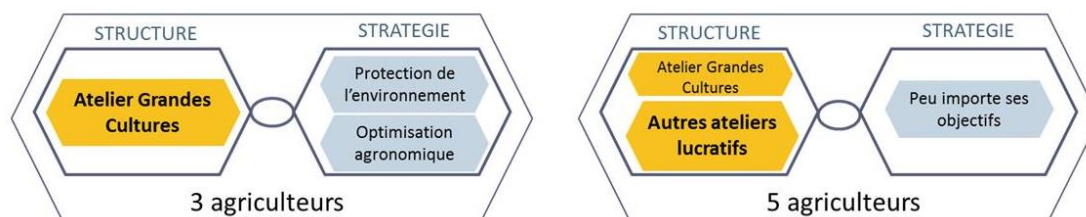


Figure 4 : schéma du fonctionnement des exploitations de type I

4.3.2 Type 2 : moyenne adéquation

Six exploitants sont de type II et les mesures de la Directive Nitrates sont en moyenne adéquate avec le fonctionnement de leur exploitation. Leur fonctionnement se compose d'un atelier grandes cultures et un atelier parallèle (tout aussi important d'un point de vue économique et temporel) soumis à divers objectifs dont celui de protéger l'environnement (cf. figure 3). Seulement, du fait des contraintes temporelles liées à l'atelier parallèle, suivant les années et conditions climatiques, les agriculteurs sont contraints de ne pas implémenter les mesures ou de façons inefficaces (pour être dans les règles) vis-à-vis de la protection de la qualité des eaux souterraines. Ces agriculteurs sont pourtant sensibilisés à la protection de l'environnement. Il serait donc cohérent pour ce type d'agriculteur, de développer des mesures à obligation de résultat. Ce changement leur permettrait d'avoir une plus grande liberté de gestion afin de les implémenter de façon optimale pour protéger la qualité des eaux souterraines.

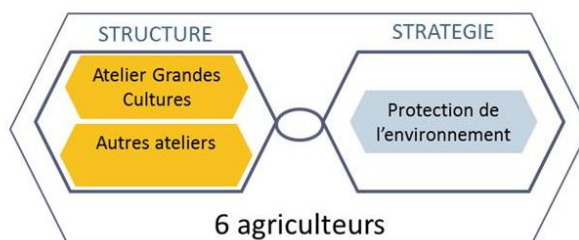


Figure 5 : schéma du fonctionnement des exploitations de type II

4.3.3 Type 3 : Faible adéquation avec les mesures de la Directive Nitrates

Huit agriculteurs sont de type III et les mesures de la Directive Nitrates est en faible adéquation avec le fonctionnement de leur exploitation. Certains ont un atelier grandes cultures seul et ont pour objectif principal la diminution des charges (cf. figure 4). C'est pourquoi la mesure pour l'insertion d'un couvert végétal en interculture impliquant de nouvelles dépenses est en très faible adéquation avec leur système. Certains ont un atelier grandes cultures avec autres ateliers chronophages et plus lucratifs (cf. figure 4). Ils ne veulent donc pas investir dans cet atelier grandes cultures soumis à la Directive Nitrates. Ces agriculteurs sont peu sensibilisés à la qualité des eaux souterraines et ne voient pas la cohérence de ces mesures pour la protéger. La recommandation serait de mettre en place une démarche participative afin d'orienter la recherche de solutions cohérentes tant en matière de fonctionnement de ces exploitations agricoles que de protection de la ressource en eaux souterraines. Il s'agit d'une démarche qui mobilise exclusivement des agriculteurs du territoire pour concevoir des scénarios à l'échelle de l'exploitation agricole. Elle est développée et présentée dans le document « Guide méthodologique pour concevoir des solutions, avec et par les agriculteurs, qui sont adaptées à leurs fonctionnements : Cas de la reconquête de la qualité des eaux souterraines ».



Figure 6 : schéma du fonctionnement des exploitations de type III

5. CONCLUSION

L'adéquation des mesures issues de la politique de l'eau est très variable en fonction des types d'exploitation. Suivant la structure (présence d'une activité en parallèle de celle de l'activité grande cultures et son caractère chronophage et/ou lucratif), la stratégie et l'environnement socio-économique de l'exploitation agricole, les mesures de la directive nitrates peuvent être plus ou moins adéquates avec le fonctionnement des exploitations agricoles. Et pour la plupart des exploitations agricoles étudiées sur les deux terrains, l'adéquation de ces mesures est relativement moyenne ou faible avec leurs fonctionnements. Cela signifie que les mesures de la Directive Nitrates (i) sont mal implémentées pour protéger la qualité des eaux souterraines (ex : semi de fonds de sac comme couvert sans irrigation sous climat méditerranéen) ou (ii) seront abandonnés dès que possible si la commune n'est plus en zone vulnérable nitrates. Ces résultats peuvent donc expliquer que la politique de l'eau actuellement proposée ait une efficacité partielle pour protéger la qualité des eaux souterraines.

La méthodologie développée propose quatre étapes facilement applicables et employables par les acteurs de l'eau pour :

1. Évaluer a posteriori les mesures écrites dans un programme d'action et leurs adéquations avec le fonctionnement des exploitations agricoles présentes sur le territoire.

2. Identifier les conditions favorables (type d'exploitation, animation territoriale...) afin d'optimiser l'implémentation des mesures et proposer des recommandations.
3. Établir une typologie d'exploitation agricole qui permet ensuite de concevoir un panel de mesures en adéquation avec le fonctionnement des exploitations agricoles par type d'agriculteurs (cf. figure 5)

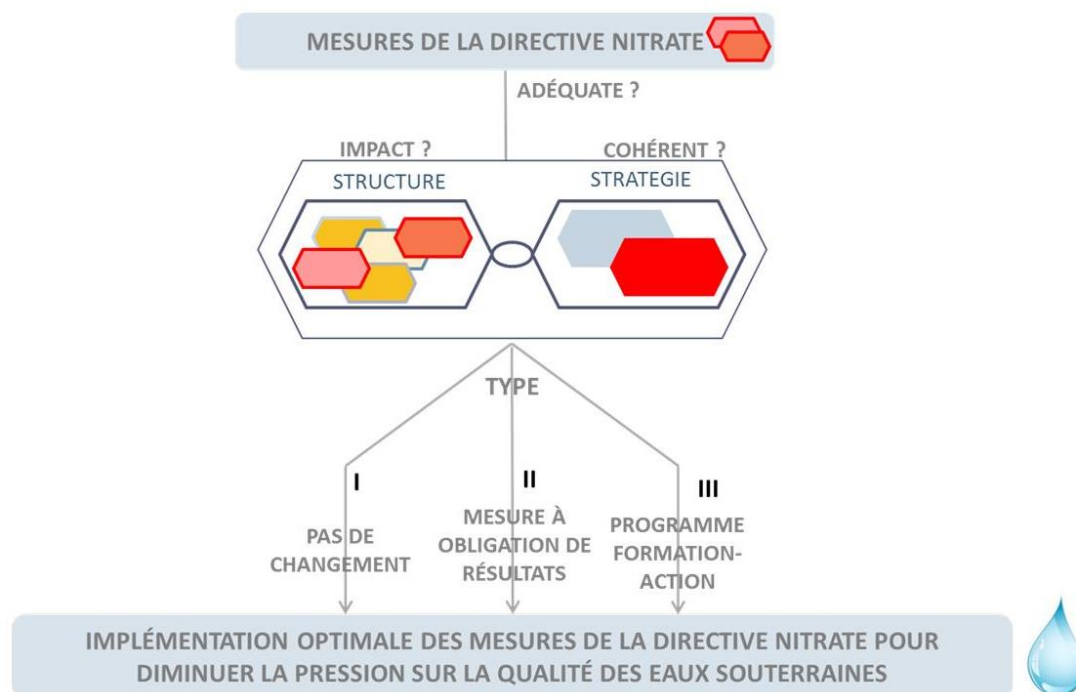


Figure 7 : schéma final de l'étude

BIBLIOGRAPHIE

Brun, A. (2003). Aménagement et gestion des eaux en France: l'échec de la politique de l'eau face aux intérêts du monde agricole. *VertigO- Rev. Électronique En Sci. Environ.* 4.

Doré, T., Le Bail, M., Martin, P., Ney, B., and Roger-Estrade, J. (2006). *L'agronomie aujourd'hui* (Editions Quae).

Kuhfuss, L., Jacquet, F., Preget, R., Thoyer, S., and others (2012). Le dispositif des MAEt pour l'enjeu eau: une fausse bonne idée? *Rev. D'Études En Agric. Environnement* Review Agric. Environ. Stud. 93, 395–421.

Menard, A., Poux, X., and Lumbroso, S. (2014). Protection des captages contre les pollutions diffuses agricoles : diagnostic, démarches et acteurs.

Oenema, O., Witzke, H.P., Klimont, Z., Lesschen, J.P., and Velthof, G.L. (2009). Integrated assessment of promising measures to decrease nitrogen losses from agriculture in EU-27. *Agric. Ecosyst. Environ.* 133, 280–288.

Annexe 1. Carte de l'AAC Hippodrome



Légende

RESEAUX ROUTIERS

- ville
- autoroute
- route départementale
- route secondaire

RESEAUX HYDRIQUES

- Durance
- canaux
- AAC
- captage "hippodrome"

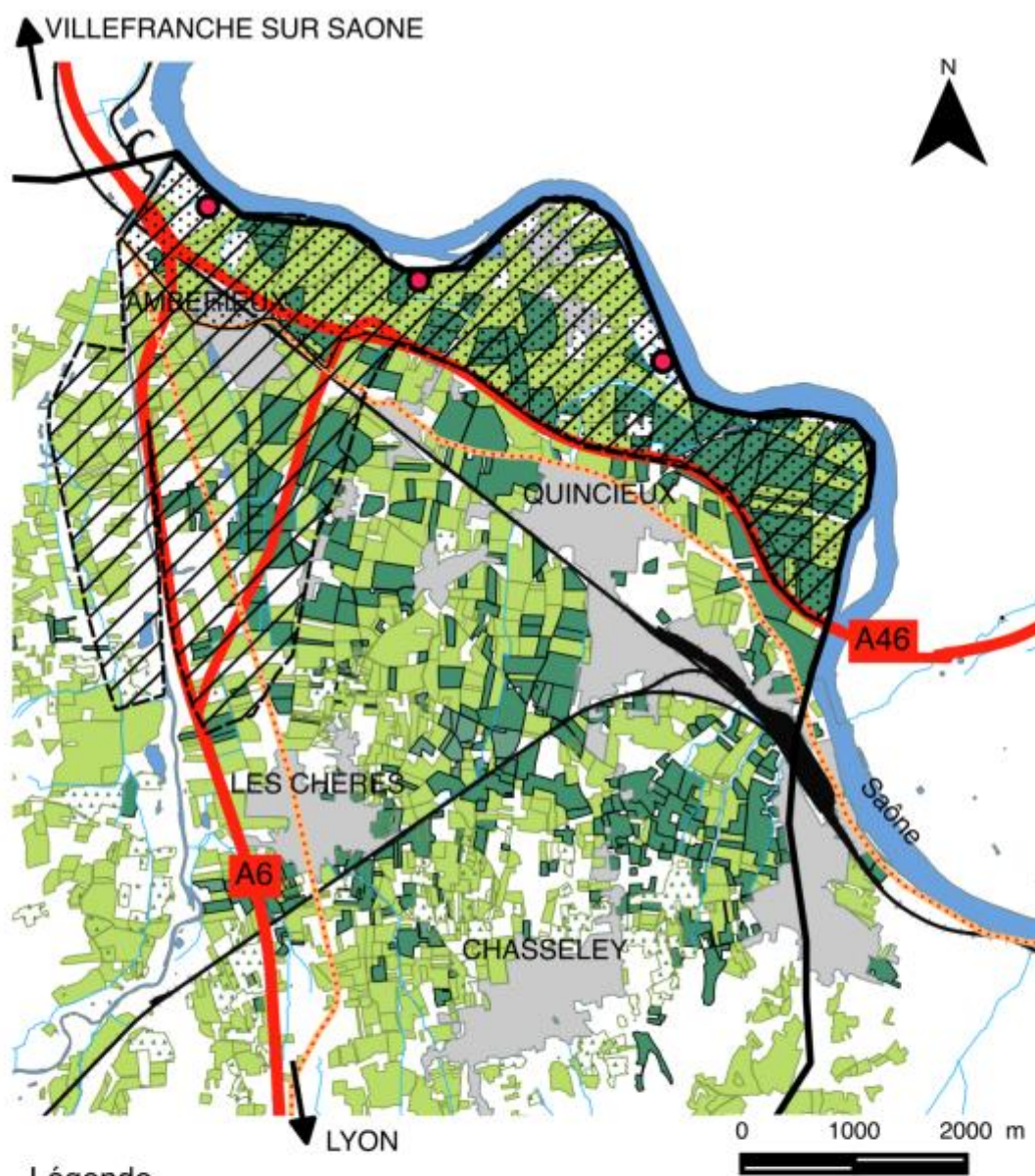
OCCUPATION SPATIALE

- ville
- forêt

EA ENQUÊTÉES

- | | |
|----|----|
| O1 | O5 |
| O2 | O6 |
| O3 | O7 |
| O4 | O8 |

Annexe 2. Carte de l'AAC Plaine des chères



Légende

INFRASTRUCTURES HYDRIQUES

- AAC "Plaine de Chères"
- Zones de Protection
- Périmètre de Protection éloigné
- champs captant
- Cours d'eau permanents
- Cours d'eau intermittents

RESEAUX DE TRANSPORT

- Autoroute
- Départemental
- Voies ferrées

VEGETATIONS ARBOREES

- Verger
- EA non enquêtés
- EA enquêtés
- Villes

Annexe 3. Tableau sur les caractéristiques des exploitations agricoles étudiées

Tableau 12 : Principales caractéristiques des 22 exploitants agricoles enquêtés (O - Agriculteurs d'Oraison sur l'AAC Hippodrome & A - agriculteurs d'Ambérieux, Quincieux... sur l'AAC Plaine des Chères ; (I) est un système conventionnel et (II) un système en agriculture de conservation ; M – maïs, B – Blé, C – Colza, Cs – Colza semence, T – Tournesol, S – Soja, S_d – Soja dérobé, So – Sorgho ; O – Orge, SF – Sainfoin ; P – Pois ; Luz - luzerne

Code agriculteur	Système	Date d'installation	SAU (ha)	UTH	Type de production Principales cultures	Type de production			Culture de semence (%)
						Maraîchage (ha)	Arboric culture	Elevage	
O1	I	1980	50	1	M/M/S et T/B/B	0	0	0	0
O2	II	1989	65	1	B/S _d ou C _s ou O/SF/P et couvert	0	0	0	10
O3	I	1995	76	2	M/O/T ou M & M/S/T ou M	5	0	0	5
O4	II	2005	60	1	M/P/C/SF ou S/couvert/M & M/M/M/B/S ou M/M..	0	0	0	0
O5	II	1986	40	1	B/S _d /couvert (leg+)/M/couvert (leg/gram)/S & B/SF & C en association avec gesse	0	0	0	0
O6	I	1989	94	2.5	B/M/S/T	0	0	0	0
O7	I	2011	30	2	Luz/B/O	0	0	20 chevaux	0
O8	I	2001	400	4	B/C et amandier (Oraison) & olivier bio, épeautre bio et B/C	0	0	20 vaches allaitantes	0
A1	I	1964	71	1.8	M/B/S/C	0	0	0	0
A2	II	1978	125	1	M/M/M/M/B ou c/B/M/B/soja	5	0	24 génisses	0
A3	I	1999	124	2	2 dicot-2gram - inversion florale	0	0	120 vaches laitières	0
A4	I	1995	82	1.5	B/O/M/Luz(4ans)	7	5	0	50
A5	I	1987	95	3	Pas fixe car selon semencier Légumes d'hiver et courges	14	0	120 ovins	10
A6	I	1997	69	3	M/B/O - Luz/B/O	0	9	0	0
A7	I	2004	40	2	T/B/M/B	0	0	40 poulets /sem + oeufs	0
A8	II	1986	60	2	M/B/S	0	4	0	0
A9	II	2011	60	1	B/S - So/S - jachère	0	0	0	0
A10	I	1997	67	1	M/M/B/B – C/S	0	0	11 vaches allaitantes	0
A11	I	1993	47	3	prairie permanente	0	0	Héliciculture	0
A12	I	2004	80	1	M/S/B/O & T/S/B/O	0	0	0	0
A13	I	1985	56	1	M/B/T	0	0	0	0
A14	I	2006	85	2.8	B/S/B/M	0	8	0	0

ANNEXE 9. GUIDE MÉTHODOLOGIQUE 2

Décembre 2017

LIVRABLE 2

Guide méthodologique pour concevoir des propositions de changement avec et par les agriculteurs, qui sont adaptées à leurs fonctionnements : Cas de la reconquête de la qualité des eaux souterraines

| Annabelle Richard
ISARA Lyon, 23 rue Jean Baldassini, 69007 Lyon



La démarche participative – les fondamentaux

POUR QUI ?

Animateur de captage
Conseiller agricole
Groupe de développement agricole

QUAND ?

Lors de l'écriture d'un plan d'action

POUR QUOI ?

Proposer une liste de mesures adaptées au fonctionnement des exploitations agricoles du territoire à enjeu eau
Assurer l'engagement des agriculteurs dans la durée pour une restauration de la potabilité

OBJECTIFS

De nombreux territoires sur le Bassin Rhône Méditerranée Corse présentent un captage touché par les pollutions dues aux nitrates et/ou aux pesticides. Or, la réduction pérenne des pollutions diffuses par les nitrates et les pesticides passe par des changements importants dans la façon dont les agriculteurs présents gèrent leurs exploitations agricoles (Agence de l'eau RMC, 2015).

Pour répondre à cet enjeu de pérennité, ce guide présente les différentes étapes d'une démarche participative centrée autour des agriculteurs. L'objectif de cette démarche est de concevoir des scénarios individuels et collectifs adaptés aux exploitations agricoles et efficaces pour une restauration de la qualité des eaux.

Pour cela, nous avons développé une démarche participative qui mobilise exclusivement les agriculteurs. Trop souvent dans ces démarches, les agriculteurs sont considérés comme une source d'information plutôt que des participants actifs. Il s'agit dans notre cas de donner un rôle central aux agriculteurs pour la conception afin de rendre la démarche participative efficace. Une importance primordiale est allouée aux connaissances locales apportées par les agriculteurs afin de favoriser la transition des exploitations agricoles vers des systèmes permettant de protéger la qualité des eaux souterraines.

Cette implication des agriculteurs tout au long du processus de conception oblige à se centrer sur l'exploitation agricole qui constitue une unité de gestion du territoire, pilotée par des agriculteurs. Cela implique de prendre en compte de façon explicite les ressources matérielles et immatérielles des exploitations agricoles de même que leurs environnements socio-économiques lors de la conception. Seulement, les résultats des démarches participatives visant à améliorer la qualité des eaux souterraines sont en général des scénarios de **système de culture**⁹ (ex : AAC Mirecourt (Reau et al., 2012) ou de répartition de systèmes de culture sur une Aire d'Alimentation de Captage (AAC) . (ex : méthode Co-Click'Eau (Chantre et al., 2012; Gisclard et al., 2015)

Aucune démarche participative visant à reconquérir et/ou protéger la qualité des eaux souterraines ne se saisit **explicitement de l'échelle de l'exploitation agricole**. Cette démarche développée ici permet d'étudier ce qu'impliquent les changements pour protéger la qualité des eaux souterraines au sein d'une exploitation agricole et donc de favoriser la transition auprès des agriculteurs concernés. Ce guide pratique est destiné majoritairement aux animateurs de captage. Il donne les marches à suivre pour accomplir une démarche participative avec les agriculteurs de son territoire.

COMMENT ?

Pour construire des scénarios cohérents tant en matière de fonctionnement des exploitations agricoles que de protection de la ressource en eaux souterraines :

⁹ « Ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique. Il se définit par (i) la nature des cultures et leur ordre de succession (ii) les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés pour les cultures retenues » (Sebillotte, 1990)

1. Les solutions développées sont produites par les agriculteurs qui ciblent avant tout leurs exploitations et environnement économique et social. Cela permet de garantir une transmission des connaissances entre pairs et non une transmission descendante issue de scientifiques ou de techniciens.
2. On aborde explicitement (i) la stratégie poursuivie par chaque agriculteur présent dans la démarche, et (ii) les différents niveaux structurels (pratiques, système de cultures, ressources matérielles et humaines...) du fonctionnement d'une exploitation agricole lors des phases de construction de solutions individuelles.
3. Le résultat de cette démarche est une combinaison de solutions associées aux différents systèmes de culture composant l'exploitation agricole. On évalue sa performance économique, agronomique, sociale à l'échelle de l'exploitation après avoir évalué son impact sur la pression de la qualité des eaux souterraines.

Références

Agence de l'eau RMC (2015). Restauration pérenne de la qualité de l'eau des captages pollués par les pesticides et les nitrates : guide pour impulser une démarche locale efficace (Agence de l'eau RMC).

Barataud, F., Reau, R., and Hellec, F. (2016). regards croisés sur des démarches de protection de l'eau associant le monde agricole. *Agron. Environ. Sociétés* 6, 115–125.

Chantre, E., Guichard, L., Gisclard, M., Nave, S., and Jacquet, F. (2012). Une démarche collective de construction de scénarios prospectifs à l'échelle d'Aires d'Alimentation de Captages pour appuyer l'élaboration de plans d'actions en vue d'améliorer la qualité de l'eau. In *Symposium PSDR 3*, p. np.

Girardin, P., Guichard, L., and Bockstaller, C. (2005). Indicateurs et tableaux de bord: guide pratique pour l'évaluation environnementale (Lavoisier Tec & Doc).

Gisclard, M., Chantre, É., Cerf, M., and Guichard, L. (2015). Co-click'eau: une démarche d'intermédiation pour la construction d'une action collective locale? *Nat. Sci. Sociétés* 23, 3–13.

Payette, A., and Champagne, C. (1997). Le groupe de codéveloppement professionnel (PUQ).

Reau, R., Monnot, L.-A., Schaub, A., Munier-Jolain, N., Pambou, I., Bockstaller, C., Cariolle, M., Chabert, A., and Dumans, P. (2012). Les ateliers de conception de systèmes de culture pour construire, évaluer et identifier des finals prometteurs. *Innov. Agron.* 20, 5–33.

Sebillotte, M. (1990). Conclusion. Systeme de culture, un concept operatoire pour les agronomes.

Démarche participative – approche globale

ETAPE PRELIMINAIRE : Avoir une vision globale du territoire

- Entretien téléphoniques avec les acteurs institutionnels (maîtres d'ouvrage, acteurs du comité de bassin) et acteurs agricoles
- Entretiens téléphoniques avec les agriculteurs de la zone à enjeu eau (AAC, ZVN...)



2 SEMAINES



ETAPE 1 (INDIVIDUELLE)

Identifier les agriculteurs témoins¹⁰ et conseillers¹¹ et avoir une vision globale du fonctionnement des exploitations agricoles témoins

- Entretien individuel avec les agriculteurs témoins
- Construction du schéma (modèle) qui représente le fonctionnement d'exploitation agricole des témoins (système de culture, ressources, environnement socio-économique...)
- Entretien préalable à l'atelier avec les témoins



1 SEMAINE/TEMOIN



ETAPE 2 (COLLECTIF)

Construire une combinaison de solutions adaptées pour les agriculteurs témoins

- Atelier de conception avec les agriculteurs inspiré du co-développement
- Retranscription de l'atelier



1 SEMAINE



ETAPE 3 (INDIVIDUELLE)

Présélectionner les solutions que les agriculteurs témoins se voient implémenter et les évaluer

- Entretien individuel avec les agriculteurs témoins
- Évaluation *in vivo* ou *ex ante* des solutions et de la combinaison de solutions
- Entretien préalable à l'atelier collectif avec les témoins



2 SEMAINES (+ si implémentation)



ETAPE 4 (COLLECTIF)

Trouver des leviers collectifs pour favoriser l'implémentation des solutions

- Atelier collectif de restitution avec tour de table en focus group
- Entretien téléphonique a posteriori avec les agriculteurs pour relever leurs avis sur l'effet de la démarche



1 MOIS

¹⁰ Agriculteurs qui ont une marge de progrès importante ou un projet à mener en accord avec celui de protéger la qualité des eaux souterraines (ex : Projet d'agroforesterie ou diminution des intrants)

¹¹ Agriculteurs qui possèdent des connaissances empiriques nécessaires pour répondre aux problématiques ou projet du témoin

Étape préliminaire – étude du territoire

AVEC QUI ?

Acteurs de la gestion de l'eau
Professionnels agricoles

POUR QUOI ?

Phase 1 : Identifier les réseaux d'acteurs sur le territoire et les enjeux liés à l'eau. Connaître le contexte technico-économique agricole, les filières présentes...

Phase 2 : Caractériser les principaux types d'exploitations.

Identifier **les agriculteurs témoins** : ceux qui ont une marge de progrès importante ou un projet à mener en accord avec celui de protéger la qualité des eaux souterraines (ex : Projet d'agroforesterie ou marge de progrès sur la diminution des intrants)

Identifier **les agriculteurs conseillers** : ceux qui possèdent des connaissances empiriques nécessaires pour répondre à ces derniers

COMMENT ?

Phase 1. Appels téléphoniques avec les acteurs territoriaux (DDT, syndicats, collectivité locale...) et acteurs agricoles (Chambre d'Agriculture, coopératives...) pour introduire la démarche et juger des enjeux agricoles et environnementaux. Établir un accord avec eux et récupérer les contacts des agriculteurs de la zone à enjeu eau.

Phase 2. Appels des agriculteurs avec comme objectif :

- Identifier leur système agricole
- Avoir un aperçu de leur objectif et de leur marge de progrès
- Présenter le protocole de l'atelier collectif avec la notion de témoin et de conseiller

Leur attribuer un rôle si intéressé à participer et convenir d'une date d'atelier.



TEMPS NECESSAIRE

Cette étape préliminaire nécessite 1 à 2 mois afin de prendre le temps de retranscrire les entretiens avec les agriculteurs et faire des fiches par agriculteurs



CONDITIONS DE REUSSITE (PRE-REQUISES)

Établir de bonnes relations avec les acteurs agricoles qui sont en contact avec les agriculteurs pouvant potentiellement participés à la démarche

Bien expliciter la démarche et son objectif aux agriculteurs et être transparent sur la durée et l'implication que cela engage.

Étape 1 – sessions individuelles

AVEC QUI ?

Avec les agriculteurs du territoire

POUR QUOI ?

Avoir une vision globale de l'exploitation agricole du **témoïn** et de son fonctionnement (SAU, UTH, systèmes de culture, élevage, matériels, main d'œuvre...). Et convenir du projet ou de(s) marge(s) de progrès sur le(s)quel(les) vont discuter les agriculteurs conseillers

COMMENT ?

Il s'agit d'un entretien semi-directif qui décrit le fonctionnement d'exploitation (démarche qui s'appuie sur le guide de Capillon et Manichon¹²) afin de relever toutes les informations nécessaires : SAU, UTH, systèmes de culture (rotation et pratiques culturales...), ressources.

Il s'agit ensuite de retranscrire l'entretien puis de schématiser ses systèmes de cultures, ses ateliers non agricoles ou agricoles, ses ressources matérielles et humaines et son environnement socio-économique (amont/aval). Ces schémas se regroupent et s'attachent sur un plateau en carton pour construire un support de discussion lors de l'atelier.

→ FICHE TECHNIQUE n°1 : Exemple d'un modèle d'exploitation sur plateau

Enfin, la dernière étape est de montrer au témoin le plateau afin qu'il puisse s'approprier ce support et s'en appuyer lors de la présentation de son exploitation face aux agriculteurs conseillers.



TEMPS NECESSAIRE PAR TEMOIN

L'entretien peut durer environ 2 à 3 heures

La retranscription et la construction du plateau nécessitent 4 jours complets

L'entretien avant l'atelier peut durer seulement 30 minutes



CONDITIONS DE REUSSITE (PRE-REQUIS)

Il faut identifier les objectifs du témoin mais aussi bien se mettre d'accord sur son projet ou ses marges de progrès. Le témoin doit s'approprier la représentation de son exploitation sur le plateau

¹² Capillon A., Manichon H. Guide d'étude de l'exploitation agricole à l'usage des agronomes. Relance agronomique, Ina Pg, Apca, 1991

Étape 2 – atelier collectif de co-développement

AVEC QUI ?

Les agriculteurs témoins et les agriculteurs conseillers
Rapport 1 témoin pour 3-4 conseillers

POUR QUOI ?

Pour construire des scénarios à l'échelle de l'exploitation agricole qui permettent de répondre au besoin des agriculteurs témoins. Il s'agit de trouver des combinaisons de solutions aux problématiques présentées par le témoin ou de l'aider à construire son projet en cohérence avec celui de protéger la qualité des eaux souterraines.

COMMENT ?

Le premier atelier se fait uniquement avec des agriculteurs issus de la même zone géographique (une AAC par exemple)

Au cours d'un atelier inspiré par une séance de co-développement (Payette and Champagne, 1997), un agriculteur convient d'être « témoin » et de présenter un Problème, une Préoccupation ou un Projet (3P), c'est-à-dire un sujet pour lequel il veut voir clair et/ou mieux agir. Les autres agriculteurs sont donc conseillers. Ce sont eux qui ont le challenge de réussir à apporter une aide utile au témoin et de proposer des nouvelles pratiques en lien avec les 3P et l'enjeu eau. Ces nouvelles pratiques proposées peuvent être proposées pour chaque système de culture constituant l'exploitation du témoin. Lors de cet atelier, nous prenons en compte l'interdépendance entre ces systèmes de culture, comme par exemple le choix des couverts proposés pour un système de culture selon la disponibilité des semences produites par un autre système de culture.

→ **FICHE TECHNIQUE n°2 : Protocole de l'atelier de co-développement**



TEMPS NECESSAIRE

La durée de cet atelier peut varier selon le nombre de témoin qui passe et de l'ampleur du contrat de départ (marge de progrès ou projet). Par témoin, il faut compter 1h30 environ. Il est préférable d'organiser cet atelier en demi-journée (cf. fiche technique n°2)

La restitution de l'atelier peut durer deux jours entiers afin de retranscrire tous les échanges entre les agriculteurs.



CONDITIONS DE REUSSITE (PRE-REQUIS)

Il faut que le contrat de départ entre l'agriculteur témoin et ses agriculteurs conseillers soit explicitement présenté.

L'animateur doit laisser les discussions libres mais doit être attentif à toutes propositions de solutions afin de compléter l'information et connaissance transmise par l'agriculteur conseiller

L'animateur doit faire en sorte que la conversation ne dérive pas sur d'autres problématiques agricoles (ex : le loup...)

Étape 3 – sessions individuelles

AVEC QUI ?

Les agriculteurs témoins

POUR QUOI ?

Identifier les solutions que le témoin agriculteur se verrait implémenter à court et long terme à partir des propositions faites par les conseillers

Évaluer *a priori* l'insertion de cette combinaison de solutions à l'échelle de l'exploitation du témoin

Rendre le témoin acteur de l'évaluation pour lequel il doit s'approprier les résultats à présenter à tous les agriculteurs présents au second atelier.

COMMENT ?

1) Entretien a posteriori du témoin. Pré-sélection des solutions qui ont émergé lors de l'atelier de co-développement

2) Phase d'évaluation : enjeu double, elle permet de vérifier (i) l'adéquation de la **combinaison des solutions** qui ont émergé lors de l'atelier avec le fonctionnement de l'exploitation agricole témoin et (ii) l'impact potentiel des solutions proposées sur la limitation de la charge polluante (pesticides et nutriments). Cette évaluation est destinée aux agriculteurs en premier lieu afin de juger de l'intérêt des solutions sur les volets économiques, agronomiques, sociaux et environnementaux.

Pour identifier la **cohérence stratégique de la combinaison de solutions** avec les objectifs de l'exploitant agricole, il faut évaluer l'écart entre la **situation actuelle (=initial)** et celle après insertion de cette combinaison de solutions sous **conditions optimales (=final)** que sont les conditions discutées lors de l'atelier. Par exemple, on évaluera la performance économique que peut apporter la solution 'couvert inter-rang sur lavandin' sans prendre en compte le potentiel envahissement du couvert sur les rangs de lavandin et donc sur le rendement final.

Pour cela, on va s'inspirer de la méthode TAB d'élaboration d'un tableau de bord à partir d'une série d'indicateurs (Girard et.al, 2005) (cf. fiche technique n°3)

→ **FICHE TECHNIQUE n°3 : Variables**

3) entretien avec le témoin : appropriation des résultats des solutions évaluées à l'échelle de son exploitation



TEMPS NECESSAIRE

Les entretiens avec le témoin ont une durée moyenne de 1 à 2 heures.

La phase d'évaluation dure 1 semaine pleine par témoin, le plus long étant de collecter les références locales afin d'évaluer au plus près de la réalité les performances économiques, agronomiques et sociales et environnementales des finals.



CONDITIONS DE REUSSITE (PRE-REQUIS)

Il est nécessaire d'avoir une rigueur technique sur l'évaluation et l'utilisation des indicateurs afin d'avoir des chiffres qui représentent la réalité et parlants aux agriculteurs.

Étape 4 – Atelier collectif

AVEC QUI ?

Les agriculteurs témoins
Les agriculteurs conseillers
Potentiellement d'autres
agriculteurs de la zone.

POUR QUOI ?

Présenter les évaluations des finals par les témoins et discuter des leviers inter-exploitations pour que les solutions proposées et évaluées ex-ante puissent être mises en place par les témoins et d'autres agriculteurs qui ont envie de tester ces solutions.

COMMENT ?

ETAPE 1 : Présentation de **l'évaluation des solutions**. Il s'agit soit d'une évaluation *in vivo* ou *ex post* car le témoin a eu le temps de les implémenter ou est en cours d'implémentation. Ou il s'agit d'une évaluation *ex ante* des solutions qu'il aimerait implémenter.

Le témoin rappelle le contrat de départ (problématique ou projet) sur lequel a porté l'atelier 1 et énumère les différentes solutions. Pour chaque solution le témoin présente son évaluation à l'échelle de son exploitation (ce que cela implique en terme de ressources matérielles et immatérielles) et ses freins éventuels à son

implémentation avec comme support une fiche (cf. fiche technique n°4)

B. Tour de table avec les agriculteurs présents avec les post-it sur :

- les résultats de l'évaluation de la solution et l'intérêt de cette solution

- L'éventuelle implémentation de la solution présentée et évaluée par ces agriculteurs

ETAPE 2 : Présentation de **la combinaison de solutions** par le témoin

→ **FICHE TECHNIQUE n°4 : Exemple de fiche solution évaluée ex ante**



TEMPS NECESSAIRE

Une demi-journée

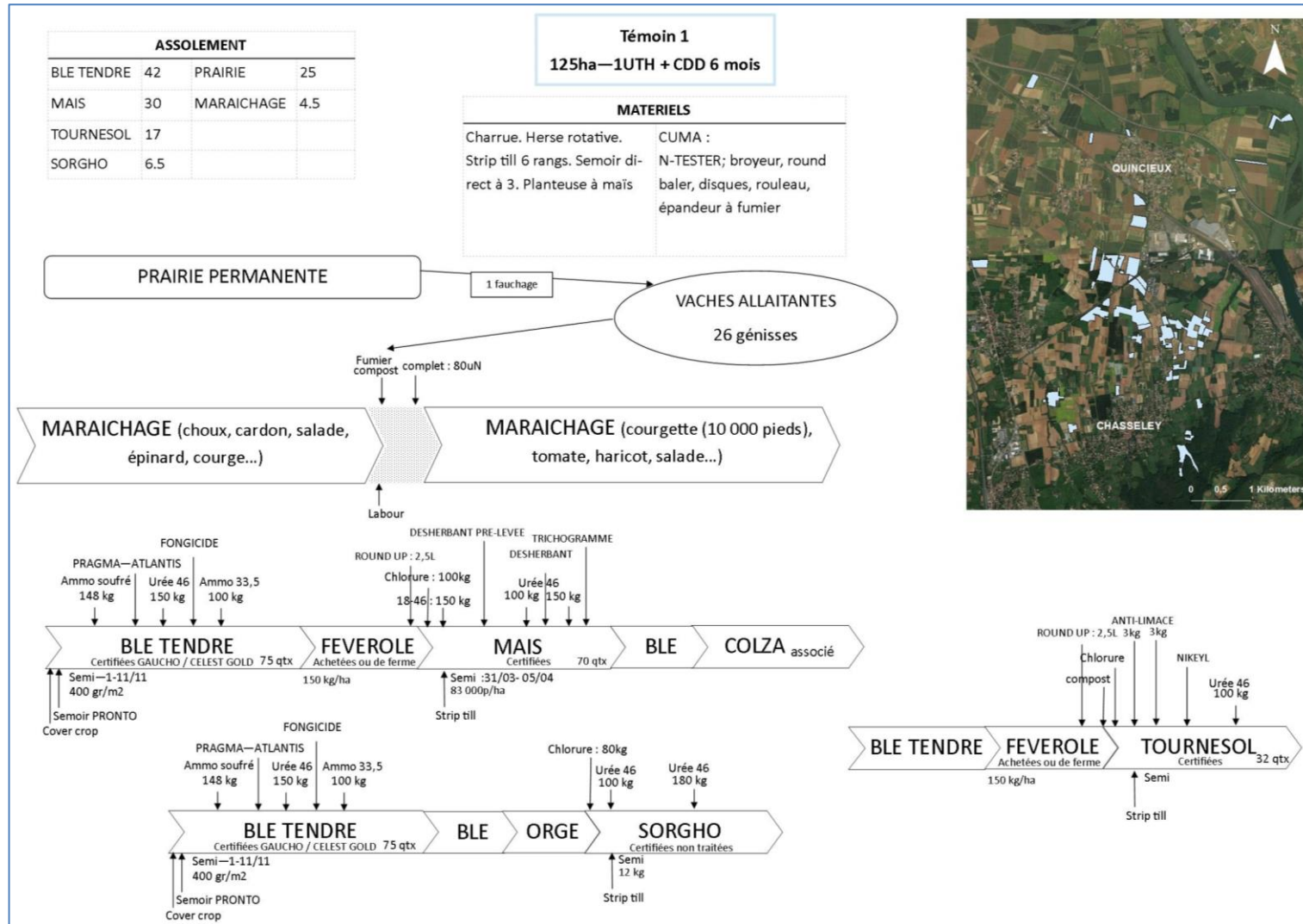


CONDITIONS DE REUSSITE (PRE-REQUIS)

Le témoin doit s'être bien approprié les solutions et leurs évaluations à l'échelle de son exploitation

Le tour de table doit se faire avec des post-it afin que tous les agriculteurs puissent échanger sur les solutions

Fiche technique n°1 – plateau d'un témoin



Fiche technique n°2 – protocole de l'atelier 1

Étapes collectifs

Étape 1 – Démarrage et brise-glace

20'

1.2.1.1 Objectif

Les brise-glace permettent à un groupe d'agriculteurs de mieux se connaître, aident à créer une atmosphère détendue et à unir les participants. Il s'agit d'éviter la présentation statique traditionnelle durant laquelle les agriculteurs présentent leurs principales productions et la taille de leur EA

De même, le tour de table des objectifs de chaque agriculteur permettra d'identifier les agriculteurs qui suivent des objectifs semblables et donc de constituer les sous-groupes de travail.

1.2.1.2 Matériels

Carte de la zone
Stylos/feutres
Papier
Cartes hexagonales
Post it
Épingles
Tableau

1.2.1.3 Contenu

Pour chaque agriculteur, il faudra qu'il suive trois étapes :

- 1- Positionner ses parcelles (ou groupement de parcelles) sur la carte affichée sur le tableau dépliant à l'aide d'un stylo. Cette première étape permet aux agriculteurs de savoir qui est présent lors de cette réunion et de se localiser. Ce sera peut-être l'occasion pour certains de se rencontrer pour la première fois.
- 2- Noter sur une feuille hexagonale pourquoi ils sont là aujourd'hui et ce qu'ils attendent de cet atelier – une attente par post-it car ensuite ils devront mettre une note sur chaque post-it développée.

Ensuite, ils pourront se diriger vers le buffet pour prendre un café/thé et croissant en attendant que tous les participants soient présents.

Étape 2 – Présentation et clarification de la démarche

15'

1.2.1.4 Objectif

Cette étape est importante pour initier un cadre de travail adéquat et favoriser une entraide entre agriculteurs. Elle permet notamment une transparence sur le déroulé de l'atelier et permet de préparer les agriculteurs sur le temps que cela leur prendra dans leur journée de travail même si cela a été dit au préalable au téléphone. Elle est notamment importante pour introduire la contrainte « qualité des eaux souterraines » matérialisée par un post-it. Il faudra expliciter que cet objectif est de diminuer la pression sur la qualité des eaux souterraines, autour des nitrates mais notamment autour des produits phytosanitaires.

1.2.1.5 Matériels

Un tableau dépliant
Des cartons « clock » qui indiqueront les heures auxquelles commenceront les différentes étapes de l'atelier
Des cartons « titre » des étapes de l'atelier
Épingles

Post-it

1.2.1.6 Contenu

Après avoir énuméré les attentes et besoins des agriculteurs écrits sur post-it, l'animateur présente dans quel cadre d'étude cet atelier va se dérouler et quels sont les objectifs de cet atelier. Puis, l'animateur présente le déroulé de l'atelier dans son détail temporel. A chaque étape, l'animateur accroche le titre de l'étape avec l'heure à laquelle elle commence puis explicite en quoi consiste cette étape.

L'animateur rappelle notamment les règles de l'atelier, noté sur des cartes punaisées, qui sont :

« **Tout est possible** »

« **Ne pas penser à l'année prochaine** »

« **La bienveillance** »

Ensuite, l'animateur demande si les agriculteurs autour de la table sont d'accord avec ces règles ou s'ils veulent faire une objection ou ajout.

Étape 3 – Constitution des sous-groupes de travail

15'

1.2.1.7 Objectif

Cette étape permet de constituer les sous-groupes de travail autour d'objectifs communs. Notre hypothèse de départ est que la prise en compte en début d'atelier des objectifs de l'agriculteur « témoin » est une méthode pour concevoir explicitement des solutions à l'échelle de l'exploitation agricole qui permettrait de favoriser l'insertion des solutions émergents de cet atelier dans l'exploitation agricole du « témoin ».

1.2.1.8 Matériels

Un tableau dépliant

Post-it

Épingles

1.2.1.9 Contenu

L'animateur demande aux agriculteurs (même les « témoins ») d'écrire sur les post-it quels sont leurs trois principaux objectifs qu'ils suivent pour mener à bien leur exploitation suivi de leurs initiales. L'animateur donne un exemple concret qui permet aux agriculteurs de comprendre la demande. Ils auront 5 minutes pour les écrire. Ensuite, ils seront ramassés par l'observateur pendant que l'animateur présentera les trois objectifs des témoins de cet atelier sans révéler leur identité. A travers la lecture des objectifs de chaque agriculteur, seront constitués les sous-groupes. L'animateur révélera l'identité des « témoins » et attribuera les « conseillers » qui travailleront ensemble. Les agriculteurs sont regroupés en deux sous-groupes de travail avec une place suffisante sur la table pour disposer le plateau représentant l'exploitation témoin.

Étapes de co-conception en sous-groupe

Étape 4 – Présentation du « témoin »

20'

1.2.1.10 Objectif

Cette étape doit permettre au « témoin » de faire comprendre ses besoins, les objectifs qu'il suit et les impasses/insatisfactions qu'il rencontre. Il permet d'inscrire l'état actuel de son exploitation, ses ressources disponibles, ses contraintes et ses atouts représentés par le plateau construit en amont de l'atelier, via un entretien avec le « témoin ».

1.2.1.11 Matériels

- plateau préconstruit qui représente l'exploitation agricole « témoin »

- stylo noir

1.2.1.12 Contenu

Le « témoin » présente ce qu'il voit comme marges de progrès dans son exploitation agricole. Il explique quelles sont les insatisfactions et les impasses qu'il rencontre pour évoluer. Il pourra s'appuyer du plateau représentant son exploitation agricole pour structurer son discours.

Étape 5 – Clarification et reformulation

30'

1.2.1.13 Objectif

Cette étape est primordiale pour que les « conseillers » s'approprient/se projettent dans l'exploitation agricole du « témoin » et récoltent toutes les informations nécessaires pour qu'ils puissent réfléchir ensemble et trouver des solutions pertinentes et intéressantes pour l'évolution de l'exploitation agricole du « témoin ». L'objectif de cette « reformulation » est importante pour être sur que les « conseillers » aient compris les impasses, les insatisfactions ou les challenges à relever que l'agriculteur « témoin » a exprimés. Elle est d'autant plus importante que le témoin n'a pas le droit d'intervenir lors de la phase de consultation.

1.2.1.14 Matériels

- plateau préconstruit qui représente l'exploitation agricole « témoin »
- **stylo noir**

1.2.1.15 Contenu

Les « conseillers » posent des questions d'information, en évitant toute forme de jugement. L'animateur doit bien faire attention à la formulation des questions quitte à reformuler et/ou rappeler le contrat de début si un agriculteur devient condescendant avec le « témoin ».

En parallèle, le plateau peut servir de support pour les « conseillers » qui peuvent orienter les questions selon leur manque d'information. L'animateur complète les feuilles, toujours avec un stylo noir.

Ensuite, les « conseillers » reformulent les besoins et impasses exprimés par le « témoin » pour que la recherche soit orientée autour de la recherche de solutions pour répondre aux besoins et notamment trouver des leviers aux impasses du « témoin ».

Étape 6 – Consultation

1h30

1.2.1.16 Objectif

Cette étape de consultation est l'étape finale pour concevoir des combinaisons de systèmes de culture à l'échelle de l'exploitation agricole qui sont adaptées aux contraintes de l'agriculteur et à ses objectifs tout en permettant de protéger la qualité des eaux souterraines.

1.2.1.17 Matériels

- Plateau représentant l'exploitation agricole « témoin »
- **stylo vert**

1.2.1.18 Contenu

Une fois le contrat de consultation formulé, les « conseillers » produisent : ils auront 5 minutes pour formuler des solutions qu'ils devront écrire sur une feuille comme réserve d'idée. Chacun produit les idées qu'il pense utiles au « témoin », il n'y a pas à se mettre d'accord avec les autres. Au contraire, même les divergences sont bienvenues, voire recherchées. Car il s'agit avant tout d'aider le témoin à « voir » autrement, à sortir de ses « schéma figés ».

Ces solutions sont notées en vert ou par l'animateur sur le plateau. En parallèle, la règle du « témoin » est de ne pas intervenir tout le long de cette discussion pour ne pas limiter l'exploration des solutions par les « conseillers ». Il écoute, fait préciser si besoin, note, s'interroge. Il a néanmoins le droit d'intervenir si les « conseillers » émettent des solutions qui sont, selon lui et ses savoirs de son exploitation, incohérentes d'un

point de vue agronomique. De plus, l'animateur a le droit d'intervenir si les solutions proposées sont en contradiction avec la contrainte de protection de la qualité des eaux souterraines.

Étape 7 – Synthèse et plan d'action

30'

1.2.1.19 Objectif

Cette étape permet au « témoin » de reprendre la parole et d'indiquer ce qu'il retient et conçoit comme plan d'action. Les « conseillers » l'aident à finaliser.

1.2.1.20 Matériels

Plateau et épingles

Épingles

Crayon à papier

1.2.1.21 Contenu

Le « témoin » reprend la parole et discute des solutions retenues et explicite son choix.

« Voici ce que j'ai découvert... »

« Voici ce que je retiens de ce que j'ai entendu... »

« Voici ce que je vais mettre en œuvre... »

Les solutions non retenues seront barrées au crayon à papier par l'animateur sur le plateau pendant que le « témoin » continue à parler. Les conseillers peuvent expliciter si besoin les solutions proposées et doivent aider le « témoin » à concevoir un plan d'action concret pour répondre à son problème, préoccupation ou projet décrit en amont.

Ensuite, les agriculteurs sont invités à continuer à partager leurs idées et opinions autour d'un buffet convivial. Cette étape sera probablement importante et les animateurs et observateurs devront prendre note des échanges entre agriculteurs.

Étapes collectifs

Étape 8 – Présentation et partage des solutions

30'

1.2.1.22 Objectif

Cette étape finale permet au « témoin » de s'approprier les solutions retenues et aux « conseillers » de découvrir d'autres solutions répondant à un autre problème, projet ou préoccupation.

1.2.1.23 Matériels

Tableau pliable

Épingles

Post it

Stylos

1.2.1.24 Contenu

Pour éviter que les agriculteurs se rassoient autour d'une table après le déjeuner, les agriculteurs avec leur café/boisson à la main pourront découvrir les solutions proposées par l'autre sous-groupe de « conseillers ». Au cours de cette découverte, le « témoin » présente en bref les solutions qui ont émergées et décrit ce qu'il en retient. Ces autres « conseillers » sont encouragés par poser des questions qui permettront au « témoin » de s'approprier les propositions faites par ses « conseillers ».

Étape 9 – Conclusion et enrôlement pour un autre atelier**30'****1.2.1.25 Objectif**

Cette étape finale permet d'évaluer les sorties de l'atelier et donc notamment la méthode de l'atelier. Puis ensuite de repérer les agriculteurs « témoin » du prochain atelier.

1.2.1.26 Matériels

Tableau pliable

Épingles

Post-it

Stylos

1.2.1.27 Contenu

Pour éviter un tour de table, l'animateur leur demande de noter de 1 à 5 les post-it sur lequel ils ont écrit leurs attentes en début d'ateliers. Avec 1 : « l'atelier n'a pas du tout répondu à mon attente », 2 : « l'atelier a répondu un peu à mon attente », 3 : « l'atelier a répondu moyennement à mon attente », 4 : « l'atelier a répondu à mon attente » et 5 : « l'atelier a répondu à mon attente et est allé au-delà ».

Enfin, l'animateur évoque la suite de cet atelier avec cette velléité de refaire ce même atelier au courant du même mois mais avec d'autres « témoins » afin de garder un dynamisme de groupe.

Fiche technique n°3 – indicateurs d'évaluation

Enjeu	Objectifs généraux	Sous-objectifs	Indicateurs ou variables considérées		unité	Références
Cohérence stratégique	Performance agronomique	Amélioration ou maintien du rendement	Écart de rendement par culture avant et après insertion de la combinaison de solutions	$\Delta R = \text{rendement}_{\text{final}} - \text{rendement}_{\text{initial}}$	kg/ha	<0 : incohérent (le changement diminue le rendement) >0 : cohérent (le final augmente le rendement)
		Amélioration ou protection de la qualité du sol	Écart de la teneur en MO avant et après insertion de la combinaison de solutions. On utilisera l'indicateur INDIGO I_{MO}	$\Delta I_{MO} = (I_{MO})_{\text{final}} - (I_{MO})_{\text{initial}}$	Sans unité	<0 : incohérent (le changement diminue la matière organique du sol) >0 : cohérent (le changement augmente la matière organique du sol)
	Performance économique	Diminution des charges	Écart charges opérationnelles et de mécanisations impliquées par l'insertion de la combinaison des solutions	$\Delta C = (CO + CMMO)_{\text{final}} - (CO + CMMO)_{\text{initial}}$	€	<0 : cohérent (le changement diminue les charges) >0 : incohérent (le changement augmente les charges)
		Augmentation de la Marge Directe	Écart entre la marge directe totale de l'exploitation agricole avant et après insertion de la combinaison de solutions	$\Delta MD = [(\text{rendement} * \text{prix}) - (CO + CMMO)]_{\text{final}} - [(\text{rendement} * \text{prix}) - (CO + CMMO)]_{\text{initial}}$	€	<0 : cohérent (le changement diminue la Marge Directe) >0 : incohérent (le changement diminue la Marge Directe)
Performance sociale	Diminution du temps de travail	Diminution du temps de travail	Écart du temps de travail avant et après insertion de la combinaison de solutions	$\Delta T = \text{temps de travail}_{\text{final}} - \text{temps de travail}_{\text{initial}}$	heure	<0 : cohérent (le changement diminue le temps de travail) >0 : incohérent (le changement diminue le temps de travail)
		Meilleure répartition du temps de travail	Concurrence du nombre d'heure travaillé par chantier liées à l'insertion de la combinaison des solutions	Calendrier d'organisation du travail	heure /quinzaine	Si les heures travaillées par chaque quinzaine est supérieure à celle de la initial, alors le chantier est en concurrence
Performance environnementale	Diminuer la quantité de pesticides	Diminuer la quantité de pesticides	Écart du nombre de traitements et des molécules utilisées potentiellement lessivable. On utilisera l'indicateur IFTSA	$\Delta IFTSA = IFTSA_{\text{final}} - IFTSA_{\text{initial}}$	Sans unité	<0 : cohérent (le changement diminue le nombre de traitement) >0 : incohérent (le changement augmente le nombre de traitement)
		Diminuer la quantité d'azote lessivable	Écart de l'azote lessivable. On utilisera le bilan azoté avec la prise en compte de l'azote fixé par les légumineuse ($N_{\text{fixé}}$)	$\Delta N = N_{\text{final}} - N_{\text{initial}}$	Kg/ha	<0 : cohérent (le changement diminue la quantité d'azote lessivable) >0 : incohérent (le changement augmente la quantité d'azote lessivable)

Fiche technique n°4 – exemple d'une fiche solution

TEMOIN 1 - 270Ha, 3 UTH

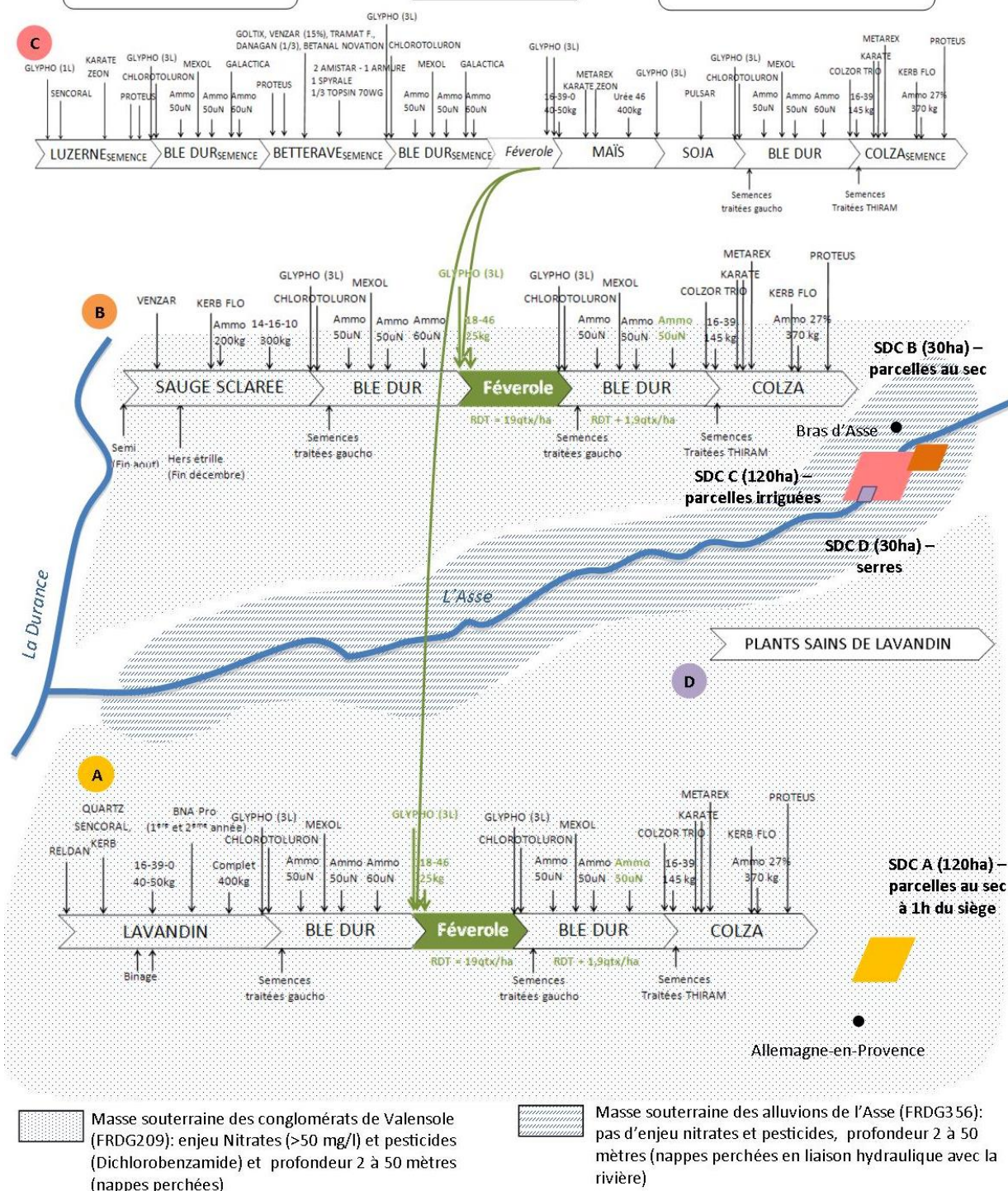
Insérer la féverole pour augmenter la rotation et diminuer la pression des ray-grass dans un système au sec.

- L'écart de rendement moyen entre un blé de colza et un blé de pois est de **+1,9 qtx/ha** (Schneider et al., 2010).
- À l'échelle de la succession pluri-annuelle, il y a compensation des risques de lixiviation entre le premier automne et le second (Plus d'azote minéral après un féverole (de 10-30kg/N) mais moins après un blé de féverole qu'un blé de blé

- 21 €/ha de charges
- 4 €/ha de marge nette

+ 8 heures totales

- 0.32 IFTSA
+ 1,9qtx/ha de blé de féverole



Title : Farm-scale approach for protecting and recovering groundwater quality. Experiencing co-design method with two groups of farmers

Keywords:

Farm-scale approach, Nitrate Directive, suitability, participatory research, farmer empowerment, groundwater management

Abstract:

Controlling groundwater diffuse pollution induced by agricultural practices has been receiving strong attention in the European Union (EU) for the last 30 years. However, in France, it remains a significant issue from farming activity. In this context, designing scenario that would tackle this issue and would be sustainably implemented by farmers have become major challenges. This research aims at taking into account each farm's components (cropping system, resources...) and each farmers' specific strategy to design and foster transition towards groundwater-friendly farming system.

First, we studied regulatory measures from Nitrate Directive that do not take into account local pattern. We worked in two case studies, with groundwater quality issues related to nitrates and pesticide pollution: Plaine des Chères and Val de Durance. Farmers located within these two fields, present various farming system and a disparity motivation in changing their practices.

Based on semi-directive interviews with 22 French farmers from these two territories, we developed a farm-scale method to assess how they implemented these measures and their suitability with their farming system. The results show that they are mostly not suitable and were actually gave up as soon as the regulation stopped during this research.

Considering this first conclusion, we sought to develop a participatory approach that will have greater success in encouraging farmers to adopt sustainable agricultural practices. Our method exclusively involves farmers to co-design more sustainable farming system over the course of individual interviews and collective workshops. The main guidance during this process was farmer empowerment: if farmers are encouraged to take ownership of redesigning, they should be more likely to implement substantial change. They shared diverse and local knowledge, and discussed relevant changes that could help their peers address a given challenge or project. Indeed, the farmers in the test groups implemented some of the recommendation in the months following the co-design process. This participatory approach could also be replicated in different regions and for different environmental challenges (*e.g.*, groundwater quantity, erosion) since the greater goal is to encourage more sustainable farming practices (*e.g.*, conservation tillage, agroecology).

Titre : L'approche systémique à l'échelle de l'exploitation agricole au service de la qualité des eaux souterraines. L'expérience d'une démarche de co-conception avec et par les agriculteurs.

Mots-clés :

Fonctionnement de l'exploitation agricole, directive nitrates, adéquation, recherche participative, 'empowerment' des agriculteurs, eaux souterraines

Résumé :

Depuis 2000, la Directive Cadre pour l'Eau fixe des objectifs ambitieux imposant un retour vers le bon état physicochimique et écologique des eaux de consommation. Toutefois, la pollution des eaux souterraines par les nitrates et les pesticides d'origine agricole persiste en France malgré la création de dispositifs réglementaires depuis bientôt 30 ans. L'enjeu actuel est donc double ; concevoir des scénarios qui permettent de protéger et reconquérir la qualité des eaux souterraines et favoriser leur mise en œuvre à long terme par les agriculteurs.

L'objectif de cette thèse est d'explicitement prendre en compte le fonctionnement global de l'exploitation agricole afin de concevoir et favoriser sa transition vers des combinaisons de systèmes de culture qui répondent à l'enjeu de protection de la qualité des eaux souterraines. Nous avons travaillé sur deux territoires du bassin Rhône Méditerranée Corse, présentant des eaux souterraines polluées par les nitrates et pesticides, la Plaine des Chères (69) et Val de Durance (04). Ces deux territoires présentent des exploitations agricoles aux systèmes variés, qui montrent une dynamique contrastée face au changement.

En premier lieu, nous avons étudié l'application des mesures proposées dans le cadre de la directive nitrates. Par leur standardisation, ces mesures sont écrites sans prendre en compte la diversité de fonctionnement des exploitations agricoles. Appuyé sur des entretiens avec 22 agriculteurs situés sur ces deux territoires, l'application par les agriculteurs de ces mesures et leur adéquation avec le fonctionnement de leur exploitation agricole ont été étudiées. Cette analyse montre qu'un grand nombre de mesures réglementaires sont peu cohérentes, ce qui conduit à des résultats insuffisants tant en termes de qualité des eaux souterraines que d'engagement dans la durée, notamment quand l'obligation est levée.

La deuxième partie a donc porté sur le développement d'une démarche participative afin de proposer de nouvelles pratiques en adéquation avec le fonctionnement des exploitations agricoles et engager une transition dans la durée garantissant la protection de la ressource en eau. L'objectif de cette démarche, caractérisée par une participation exclusive des agriculteurs, est de co-concevoir des scénarios "sur mesure" à l'échelle de l'exploitation agricole. Ces scénarios répondent aux projets des agriculteurs tout en permettant une limitation des pollutions d'origine agricole. Cette méthode a été expérimentée avec deux groupes d'agriculteurs provenant des deux territoires d'étude. Les résultats montrent que l'expertise collective des agriculteurs a produit des propositions de changements qui encouragent une mise en œuvre de la part des agriculteurs tout en permettant de diminuer la pression polluante sur les eaux souterraines. En effet, certains agriculteurs de ces deux groupes ont mis en œuvre les propositions dans les mois qui ont suivis la démarche.