Hors-série 2014

Sciences Eaux & Territoires

La revue d'Irstea

Article hors-série numéro 14

Restaurer le bon état à l'échelle d'une masse d'eau souterraine affectée par les pollutions diffuses d'origine agricole : où et comment agir au moindre coût ?

Cécile HÉRIVAUX, Laurence GOURCY et Laurent CADILHAC



www.set-revue.fr



Sciences Eaux & Territoires, la revue d'Irstea

Article hors-série numéro 14 – 2014

Directeur de la publication : Jean-Marc Bournigal
Directeur éditorial : Nicolas de Menthière
Comité éditorial : Daniel Arnault, Louis-Joseph Brossollet, Denis Cassard, Camille Cédra, André Évette, Véronique Gouy, Alain Hénaut, Bruno Hérault, Emmanuelle Jannès-Ober, Philippe Jannot, Virginie Keller, Thomas Curt, André Le Bozec, Chrystel Prudhomme, Christian Romaneix pour le CINOV TEN et Michel Vallance.
Rédactrice en chef : Caroline Martin
Secrétariat de rédaction et mise en page : Valérie Pagneux
Infographie : Françoise Peyriguer
Conception de la maquette : CBat
Contact édition et administration : Irstea-DP2VIST
1 rue Pierre-Gilles de Gennes – CS 10030
92761 Antony Cedex
Tél. : 01 40 96 61 21 – Fax : 01 40 96 61 64
E-mail : set-revue@irstea.fr
Numéro paritaire : 0511 B 07860 – Dépôt légal : à parution
N°ISSN : 2109-3016
Photo de couverture : © Ludmila Smite - Fotolia.com

Pour mieux affirmer ses missions, le Cemagref devient Irstea.

irstea

Restaurer le bon état à l'échelle d'une masse d'eau souterraine affectée par les pollutions diffuses d'origine agricole : où et comment agir au moindre coût ?

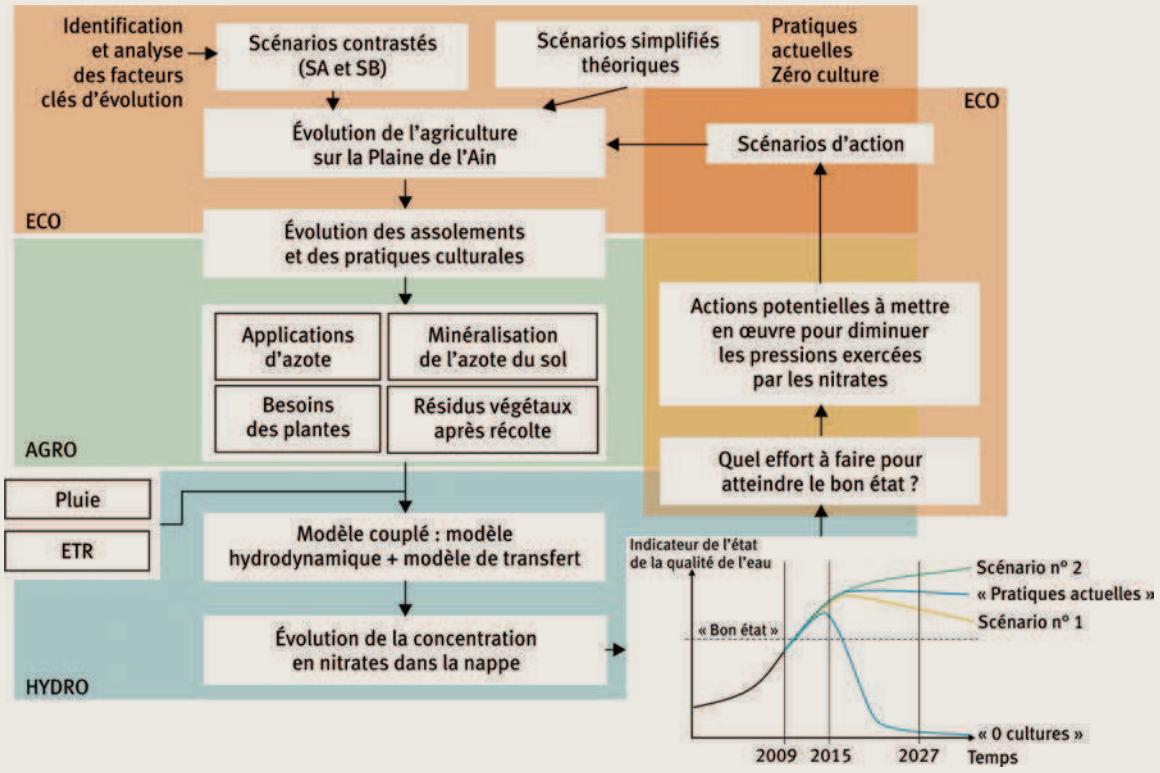
La directive cadre sur l'eau nécessite la mise en place des programmes d'actions pour restaurer le bon état des masses d'eau souterraines d'ici 2027 au plus tard, et ce au moindre coût. Face aux difficultés rencontrées pour sélectionner des actions de restauration efficaces, cet article apporte un éclairage méthodologique innovant sur la conduite d'une évaluation économique pour définir un programme d'actions visant à améliorer la qualité d'une masse d'eau souterraine dégradée par les nitrates d'origine agricole.

Plus de 40 % des masses d'eau souterraine en France étaient en mauvais état chimique au démarrage des derniers schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGEs), principalement du fait des pollutions diffuses d'origine agricole. Dans ce contexte, la directive cadre sur l'eau (DCE, 2000/60/CE) a demandé à chaque État membre de définir et de mettre en place des programmes d'actions permettant de restaurer le bon état des eaux souterraines d'ici 2015 (2027 au plus tard), et ce au moindre coût (actions sélectionnées sur la base d'une analyse coût-efficacité). En France, la préparation des programmes d'actions par les agences de l'eau et les services de l'État se heurte à plusieurs difficultés :

- des difficultés liées à la complexité du fonctionnement des systèmes hydrogéologiques. Il existe encore peu d'outils mobilisables à l'échelle des masses d'eau souterraine permettant de faire le lien entre des modifications de pressions agricoles et une évolution de la qualité des eaux souterraines. En l'absence d'une bonne connaissance du fonctionnement de ces milieux, l'évaluation *ex ante* de l'efficacité de programmes d'actions et l'identification des zones sur lesquelles il est le plus pertinent d'agir ne peuvent être réalisées que de manière très approximative ;
- des difficultés liées aux incertitudes associées à l'évolution de l'agriculture. Préparer un programme d'actions, c'est tout d'abord connaître l'effort à faire pour atteindre le bon état chimique des masses d'eau souterraine. En d'autres termes, on a besoin de comprendre de quelle manière l'agriculture et les pressions associées (et la qualité de la nappe résultante) évolueraient dans le temps en l'absence de programme d'actions. Les incertitudes associées à l'évolution de l'agriculture sont nombreuses et encore relativement peu intégrées dans les travaux de préparation des programmes d'actions ;
- des difficultés liées au choix et au dimensionnement des actions : quelles actions mettre en œuvre pour atteindre le bon état ? Où est-il le plus efficace d'agir ? Quelle acceptabilité économique des actions proposées ? En particulier, le surcoût généré pour les exploitants agricoles par la mise en œuvre de ces actions est un élément clé à considérer dans la définition des programmes d'actions. En effet, alors que les mesures agro-environnementales (MAE) sont classiquement préconisées pour lutter contre les pollutions diffuses d'origine agricole, celles-ci sont souvent peu mises en œuvre du fait d'un niveau de subvention trop faible pour être acceptable d'un point de vue économique par les exploitants agricoles.

Cet article propose un éclairage méthodologique sur la manière de sélectionner des actions de restauration du bon état d'une masse d'eau souterraine affectée par les pollutions diffuses d'origine agricole, et de cibler les secteurs géographiques sur lesquels les mettre en œuvre à moindre coût. Il décrit plus particulièrement la démarche et les outils mobilisés pour répondre à chacune des difficultés mentionnées ci-dessus. La méthodologie est appliquée sur la masse d'eau des alluvions de la plaine de l'Ain. Cette masse d'eau est représentative des masses

❶ Vue d'ensemble de la démarche



d'eau de type alluvions anciennes du bassin Rhône-Méditerranée, sur lesquelles se sont progressivement développés des systèmes de production agricoles intensifs et qui sont aujourd'hui particulièrement concernées par les pollutions diffuses d'origine agricole.

Présentation du cas d'étude

La nappe alluviale de la plaine de l'Ain (360 km²) est située à une trentaine de kilomètres au nord-est de Lyon. Elle s'étend de part et d'autre de la rivière Ain, à l'amont de sa confluence avec le Rhône. La nappe regroupe principalement des alluvions anciennes fluvio-glaciaires composées de galets et de graviers sur 2 à 40 m d'épaisseur avec une bonne perméabilité (11×10^{-3} m/s) ainsi que des alluvions plus récentes de 4 à 15 m d'épaisseur à plus faible perméabilité (1 à 2×10^{-3} m/s). Ces formations sont recouvertes de sols limono-argilo-sableux caillouteux et peu profonds rendant la nappe particulièrement vulnérable aux pollutions de surface, notamment aux pollutions diffuses d'origine agricole. L'agriculture occupe la majorité de la superficie de la nappe, avec plus de 20 000 ha cultivés par des exploitations en majorité spécialisées dans la monoculture de maïs irrigué. D'importants volumes sont prélevés dans la nappe (17 millions de m³ en 2010), principalement pour l'irrigation (54 %) et l'industrie (37 %). L'usage eau potable est aujourd'hui résiduel (8 %), la plupart des captages ayant été abandonnés pour cause de dépassement des normes sanitaires en nitrates. Les pressions exercées sur la nappe sont particulièrement importantes dans sa partie sud, où la masse d'eau des alluvions de la plaine de l'Ain (185 km²) a été délimitée. Celle-ci a été identifiée à risque de non-atteinte du bon état chimique à l'horizon 2015, et est située en zone vulnérable depuis les années 1990. Localement, le Syndicat de la Basse Vallée de l'Ain (SBVA), structure locale dédiée à la mise en œuvre du SAGE approuvé en 2003, est particulièrement impliqué dans la préparation des programmes de restauration de la qualité de la masse d'eau souterraine.

Aperçu général de la méthodologie

La méthodologie proposée repose sur l'articulation de méthodes participatives et de modèles, et mobilise le couplage d'approches économiques, agronomiques et hydrogéologiques à l'échelle d'une masse d'eau souterraine (figure ❶). Le volet économique concerne la construction de scénarios d'évolution de l'agriculture sur la masse d'eau. Le volet agronomique traduit ces différents scénarios en évolution des apports en fertilisants, des besoins en azote des plantes, de la minéralisation des sols et des résidus végétaux. Ces données sont utilisées par le volet hydrogéologique en entrée d'un modèle de transport couplant un modèle hydrodynamique de nappe et un modèle de transfert de nitrates dans la zone non saturée, de manière à simuler l'évolution de la concentration en nitrates dans la nappe et évaluer les efforts à faire pour restaurer le bon état. En réponse, le volet économique intervient pour sélectionner les actions permettant d'atteindre le bon état au moindre coût, ainsi que les secteurs sur lesquels les mettre en œuvre.

Compréhension et modélisation du fonctionnement du système hydrogéologique

Dans un premier temps, deux campagnes de prélèvement d'eau (2008 et 2009) avec datation des eaux et mesures physico-chimiques ont permis d'améliorer les connaissances sur le fonctionnement dynamique et sur l'état chimique de la nappe alluviale.

La modélisation des concentrations en nitrates et la simulation de l'évolution future de la qualité de la nappe se sont ensuite appuyées sur le développement d'un modèle de transport couplant un modèle hydrodynamique de nappe (MARTHE) et un modèle de transfert de nitrates dans la zone non saturée depuis la surface jusqu'à la nappe (BICHE) (figure ❶).

Le modèle hydrodynamique a été repris à partir d'un modèle existant développé par la société Burgéap pour le compte du conseil général de l'Ain, complété et retranscrit sous le logiciel MARTHE (Thiéry, 1995). Ce modèle maillé monocouche a été mis en œuvre sur la période 1999-2007 au pas de temps décadaire. Il fait intervenir un bilan hydroclimatique pour estimer l'infiltration pluviale, à partir de la pluie et de l'évapotranspiration réelle (ETR), en considérant sept zones d'infiltration homogènes. Les relations nappe-rivière ont été prises en compte.

Après calage préalable, ce modèle hydrodynamique a été couplé avec le modèle déterministe de transfert BICHE (Thiéry et Seguin, 1985). Le modèle BICHE permet d'estimer les flux de nitrates sortant du système sol-plante vers les eaux souterraines et de simuler le fonctionnement du système sol-eau-plante-atmosphère au pas de temps décadaire, en prenant en compte les précipitations, l'évapotranspiration, l'apport en fertilisants, les besoins en azote des plantes, la minéralisation des sols et les résidus végétaux par type de cultures (Gourcy *et al.*, 2008). Les résultats de BICHE étant ponctuels (1D) dans l'espace, des secteurs homogènes du point de vue du fonctionnement hydrodynamique et des pressions agricoles (onze secteurs de 10 à 50 km²) ont été définis sur la base du croisement de critères géologiques, hydrogéologiques, agronomiques et pédologiques afin d'extrapoler les résultats sur l'ensemble de la nappe. Pour chacun des secteurs, les chroniques de concentrations en nitrates rassemblées dans la base de données ADES (www.ades.eaufrance.fr/) et complétées par celles de l'Association syndicale d'irrigation de l'Ain ont été utilisées pour calibrer le modèle.

Le modèle de transport BICHE-MARTHE a été utilisé pour simuler les concentrations en nitrates observées de 1975 à 2009, pour chacune des mailles de modélisation (78 600 mailles de 0,2 à 4 ha). La simulation a été menée à l'échelle de l'ensemble de la nappe alluviale et sur plus de trente ans, échelle de temps qui permet un équilibrage des concentrations en nitrates dans les différents réservoirs du modèle simulant les transferts. Le modèle reproduit globalement bien les tendances de la distribution spatiale des concentrations en nitrates observées en 1999 et 2008. Les concentrations moyennes modélisées reproduisent notamment bien le niveau important de pollution par les nitrates observé en 2008, avec près de la moitié (46 %) de la superficie de la masse d'eau dépassant 40 mg/l (figure ❷). Les tendances saisonnières et interannuelles sont toutefois assez mal restituées et les ordres de grandeur simulés restent entachés d'une imprécision spatiale due en partie à la forte hétérogénéité de la distribution des concentrations en nitrates dans cet aquifère fluvio-glaciaire. Cependant, les résultats globalement satisfaisants obtenus lors du calage ont permis l'utilisation du modèle pour simuler l'impact de scénarios d'évolution des types de cultures et de pratiques sur la qualité de la masse d'eau souterraine, pour les années 2015, 2021 et 2027.

De quelle manière la qualité de la nappe évoluerait-elle en l'absence de programme d'actions ? Les apports de la prospective

Deux scénarios simplifiés théoriques d'évolution des pressions agricoles sont classiquement testés par les modèles de transport de nitrates : un scénario « zéro culture » (ici scénario 0) qui considère un arrêt total des apports de nitrates d'origine agricole et un scénario « continuité » (ici scénario C) qui fait l'hypothèse d'un maintien à l'identique des usages des sols et des pratiques. La simulation de ces scénarios par le modèle de transport BICHE-MARTHE a permis de donner des premiers éléments sur l'inertie de la nappe et la réversibilité de la contamination en nitrates (figure ❷). L'arrêt des apports en fertilisants (scénario 0) conduit à une diminution assez rapide de la concentration en nitrates dans la masse d'eau, avec un retour à un niveau de qualité naturelle pouvant cependant nécessiter sur certains secteurs plus d'une dizaine d'années. La poursuite des pratiques actuelles (scénario C) conduit à une augmentation de la concentration moyenne en nitrates autour de 40 mg/l, avec plus de 30 % de la superficie de la masse d'eau dépassant 50 mg/l en 2027.

Cependant, les incertitudes relatives à l'évolution des systèmes de production et des pratiques culturales actuellement présents sur la plaine de l'Ain sont nombreuses (encadré ❶) : l'agriculture de la plaine de l'Ain

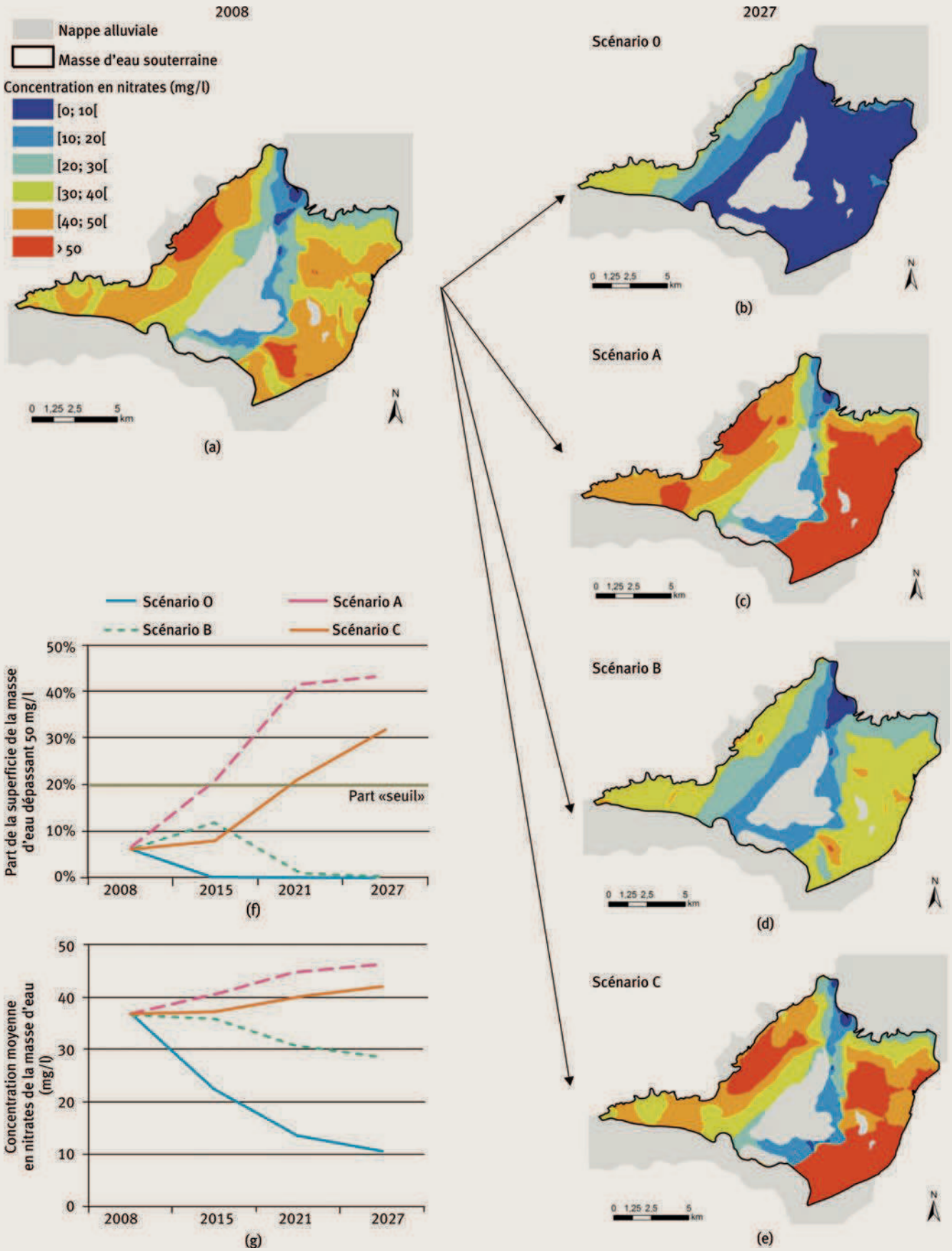
❶ INCERTITUDES ET PROSPECTIVE

Plusieurs sources d'incertitudes sont associées à l'évolution de la concentration en nitrates dans les eaux souterraines : les incertitudes liées à la compréhension du fonctionnement agronomique et hydrogéologique, les incertitudes liées à nos connaissances sur les systèmes de production et les pratiques culturales, mais aussi les incertitudes liées à l'évolution de l'agriculture. Nos travaux s'intéressent spécifiquement à ce dernier type d'incertitudes.

La méthode des scénarios, méthode issue de la prospective (Godet et Roubelat, 1996) a été utilisée pour explorer différents futurs possibles de l'agriculture sur la plaine de l'Ain. Sept acteurs locaux ont été mobilisés pour la mise en œuvre de cette démarche, lors d'entretiens individuels et d'un atelier de prospective. Cette méthode n'a pas pour objectif de prédire les évolutions futures, mais d'explorer les futurs possibles. Elle se base sur une analyse des incertitudes associées aux différents facteurs de changement de l'agriculture, sans toutefois pouvoir considérer leur probabilité d'occurrence.

La construction des scénarios s'est basée sur une analyse des incertitudes associées à sept grands types de facteurs de changement, identifiés comme pouvant avoir une forte influence sur l'évolution de l'agriculture de la plaine de l'Ain : l'évolution de la politique agricole commune (PAC) et des cours mondiaux des céréales et oléoprotéagineux, l'évolution de la disponibilité de la ressource en eau pour l'irrigation, l'évolution de l'aménagement du territoire, l'évolution de la régulation et de la demande environnementale, l'évolution du prix de l'énergie et de la demande en biocarburants, l'évolution des attaques et de la maîtrise des attaques par la chrysomèle, ainsi que les innovations technologiques.

❷ Évolution de la qualité de la masse d'eau souterraine en l'absence de programme d'actions :
a) situation en 2008 ; b)-e) situation modélisée en 2027 pour chaque scénario ;
f) évolution de la part de la superficie de la masse d'eau dépassant 50 mg/l ;
g) évolution de la concentration moyenne à l'échelle de la masse d'eau.



en 2027 ne peut se résumer à un statu quo de l'assolement et des pratiques culturales actuelles, ni même à une simple poursuite de tendances. Deux futurs possibles de l'agriculture en 2027 (scénario A et B) inspirés des scénarios de la Bussière (Poux *et al.*, 2005) [1] ont été explorés et co-construits en utilisant les points de vue et savoirs des acteurs locaux par la mise en œuvre de la méthode des scénarios (Hérivaux *et al.*, 2012), puis traduits en termes d'évolution des usages des sols et des pratiques à l'échelle de chaque secteur homogène (tableau ❶).

Plusieurs hypothèses sont communes aux deux scénarios : la forte volatilité des cours mondiaux des céréales et oléoprotéagineux, l'augmentation du prix de l'énergie, des innovations technologiques fortes et une poursuite tendancielle de l'urbanisation de la plaine.

Ces scénarios diffèrent néanmoins sur de nombreux points. Le scénario A ou « agriculture compétitive et environnement agro-efficace » décrit une diminution drastique des aides du premier pilier de la PAC [2] et un alignement des prix européens des céréales et oléoprotéagineux sur les cours mondiaux. Les aides du second pilier de la PAC restent peu attractives et les politiques de régulation environnementale peinent à être respectées.

❶ **Synthèse chiffrée de l'évolution de l'agriculture sur la masse d'eau.**

	2008*	2027**	
		Scénario A	Scénario B
Exploitations (nombre) Surface agricole utile (SAU, ha) Surface en céréales et oléoprotéagineux (SCOP, ha) % SCOP/SAU totale Superficie irrigable (ha) % Superficie irrigable/SCOP	182 10 142 8 967 88 % 7 202 80 %	45 9396 8 842 94 % 7 409 84 %	143 9 396 8 287 88 % 6 474 78 %
Céréales (ha) dont maïs grain et semences (ha) % Superficie en maïs/SCOP	8 538 7 123 83 %	8 842 6 974 79 %	5 525 2 762 50 %
Oléoprotéagineux (ha)	429	–	2 762
Gel (ha)	708	–	–
Surface en éléments topographiques (ha)	–	470	940
Surface fourragère principale (ha) dont superficie toujours en herbe (ha)	177 39	84 84	169 169
Successions culturales type (B : blé ; M : maïs ; O : orge ;S : soja ; T : tournesol)	Monoculture de maïs MMOTB	MMMMMB MMB	MMOTB SBMT
Marge brute moyenne hors aides PAC €/ha SAU/an €/ha SCOP/an	 446 503	 468 496	 243 273
Estimation aides PAC totales (millions €) Aides PAC moyennes par exploitation (€/EA) Aides PAC moyennes par ha de SCOP (€/ha)	6,06 27 649 489	1,52 27 649 124	6,06 35 233 529

Sources :
* Données à l'ilot cultural du Recensement parcellaire graphique 2008 (ASP) agrégées à l'échelle des 6 secteurs de modélisation situés sur la masse d'eau ; paiements directs moyens versés aux agriculteurs sur les 19 communes de la masse d'eau sur la période 2007-2008 (**https://ww1.telepac.agriculture.gouv.fr**) ;
données économiques de la chambre d'agriculture de l'Ain.
** Auteurs.

Ces évolutions confortent la mise en place de systèmes de production de grande taille (quadruplement de la taille des exploitations) spécialisés en maïsiculture irriguée, avec des préoccupations environnementales subordonnées à un objectif prioritaire de productivité. La politique de lutte contre la chrysomèle ainsi que la diminution des volumes prélevables pour l'irrigation (jusqu'à –20 % dans certains secteurs) sont les seuls freins au « tout maïs irrigué », qui occupe 79 % des surfaces en céréales et oléoprotéagineux (SCOP) en 2027 (tableau ❶). En réponse à ces évolutions, la qualité de la masse d'eau se dégrade progressivement, avec une concentration moyenne supérieure à 45 mg/l et plus de 40 % de la superficie dépassant 50 mg/l en 2027 (figure ❷), dans la partie sud essentiellement.

Le scénario B ou « agriculture haute performance environnementale (HPE) » décrit une réorientation radicale de l'ensemble des aides PAC vers le soutien à une agriculture HPE, de manière à permettre l'autosuffisance alimentaire européenne tout en garantissant un prix raisonnable des produits certifiés HPE pour le consommateur. Les aides de la nouvelle PAC sont allouées sur la base du respect de normes éco-conditionnelles très strictes : les bonnes conditions agricoles et environnementales actuelles sont maintenues, la rotation des cultures devient obligatoire, et 10 % de la surface agricole utile (SAU) doit être convertie en surfaces de compensation écologique.

Les exigences des politiques de régulation environnementale font désormais partie du cahier des charges HPE. Le volume prélevable pour l'irrigation diminue de 40 % dans certains secteurs. Ce scénario conduit à la conversion progressive des systèmes de production actuels à des systèmes HPE, au ralentissement du rythme d'agrandissement des exploitations, à une diversification importante des assolements et à une réduction des intrants utilisés (tableau ❶). Ces évolutions conduisent à une amélioration de la qualité de la masse d'eau, avec une concentration moyenne inférieure à 30 mg/l et aucun point dépassant 50 mg/l en 2027 (figure ❷).

Ces deux scénarios conduisent à des situations très différentes en termes d'évolution des concentrations en nitrates dans la masse d'eau : alors que le scénario B permet d'atteindre durablement le bon état chimique [3],

1. Le premier scénario (scénario A) se rapproche du scénario n° 1 « La France des filières, l'environnement agro-efficace », ainsi que de la déclinaison du scénario n° 2 en zone productive « l'agriculture duale, une partition environnementale ».
Le second scénario (scénario B) se rapproche largement du scénario n° 4 « une agriculture haute performance environnementale ».
2. Le premier pilier de la PAC inclut les paiements directs et les instruments relatifs au fonctionnement des marchés agricoles. Le second pilier est relatif à la politique de développement rural, il inclut notamment les dispositifs de financement des mesures agro-environnementales (MAE).
3. Conformément aux recommandations françaises pour l'application de la directive cadre sur l'eau, une masse d'eau souterraine est considérée en bon état chimique dès lors que la valeur seuil de 50 mg/l n'est pas dépassée sur plus de 20 % de sa superficie (part « seuil ») et que la tendance n'est pas à la dégradation de la qualité.

le scénario A rend nécessaire la mise en œuvre de programmes d'actions pour infléchir la tendance à la dégradation, et diminuer la part de la masse d'eau où la concentration en nitrates est supérieure à 50 mg/l (de 43 % à moins de 20 %). Le scénario A, considéré par les acteurs locaux comme le plus probable, est utilisé dans la suite de cet article comme base pour construire un programme d'actions de lutte contre les pollutions diffuses.

Quelles actions mettre en place pour l'atteinte du bon état ? Où est-il le plus efficace d'agir ? Quelle acceptabilité économique des actions proposées ?

En réponse à la dégradation de la qualité des eaux souterraines dans le scénario A, cinq actions ont été retenues à dire d'expert comme particulièrement pertinentes pour diminuer les pressions exercées par les nitrates (tableau ❷) : d'une part, l'augmentation des superficies en prairies, avec ou sans valorisation de fourrage (P1 et P2), et d'autre part, la mise en œuvre de trois type de rotations[4] (R1, R2, R3), visant à diminuer la fréquence du retour du maïs sur une même parcelle. La mise en œuvre de chaque action a été simulée individuellement par le modèle de transport, avec trois périmètres de mise en œuvre possible : (i) l'ensemble de la masse d'eau, (ii) la partie située en rive gauche de la rivière Ain ou (iii) la partie située en rive droite.

Le coût d'une action est évalué comme le surcoût moyen lié à la mise en œuvre de l'action pour les exploitants agricoles. Ce surcoût est estimé comme la différence de marge brute hors subvention PAC entre l'assolement résultant de la mise en œuvre de l'action et l'assolement du scénario A. L'efficacité d'une action est évaluée à partir des résultats du modèle de transport comme la diminution du pourcentage de la superficie de la masse d'eau dépassant 50 mg/l en 2027. Les actions peuvent être classées les unes par rapport aux autres selon leur ratio coût-efficacité, considéré ici comme le coût nécessaire pour diminuer de 1 % la part de la masse d'eau dépassant 50 mg/l.

Parmi les cinq actions testées, l'action R1 qui consiste à limiter la fréquence de retour du maïs dans la rotation à trois années sur quatre maximum, a le meilleur ratio coût-efficacité et permet de stabiliser les concentrations en nitrates à partir de 2021 autour 40 mg/l, avec toutefois une augmentation de la part de la superficie de la masse d'eau dépassant les 50 mg/l jusqu'à près de 20 % en 2027 (figure ❸). Le surcoût lié à sa mise en œuvre est évalué à 150 000 euros par an, soit 23 euros par hectare de SCOP en moyenne. L'action R2, avec une fréquence de retour du maïs de deux années sur trois maximum, permettrait de stabiliser les concentrations à 38 mg/l en moyenne, avec environ 10 % de la superficie de la masse d'eau dépassant 50 mg/l en 2027. Le surcoût lié à sa mise en œuvre est évalué à 339 000 euros par an, soit 52 euros par hectare de SCOP en moyenne. L'action R3 entraînerait un coût de mise en œuvre beaucoup plus important (1,4 millions d'euros par an), pour une efficacité légèrement meilleure. Les actions de reconversion de 5 % de terres arables en prairie de fauche (P1) ou en gel sans

4. Ces mesures ont été définies dans le cadre du projet de recherche et ne doivent pas être confondues avec les dispositifs MAE existants. Elles se distinguent de la MAE rotationnelle 2010 sur de nombreux points (exige au moins 4 cultures différentes, la culture majoritaire couvrant moins de 50 % de la surface engagée, part des 3 cultures majoritaires inférieure à 90 %...). Ainsi, par exemple, R1 et R2 impliquent la présence du maïs sur plus de 50 % de l'assolement et ne font pas intervenir 4 cultures différentes.

❷ **Description des cinq actions retenues, mode d'évaluation du coût associé et surface de mise en œuvre simulée à l'échelle de l'ensemble de la masse d'eau.**

Action	Description	Coût direct	Surface de mise en oeuvre
P1	Reconversion de 5 % des terres arables en prairies de fauche (avec fertilisation et vente du foin)	327-392 €/ha/an : différence entre la marge brute moyenne d'une prairie de fauche (121 €/ha/an) et des successions culturales type du scénario A*	5 % de la SCOP (445 ha)
P2	Reconversion de 5 % des terres arables en gel sans production	448-513 €/ha/an : perte de la marge brute moyenne correspondant aux successions culturales type du scénario A*	5 % de la SCOP (445 ha)
R1	Diminution de la fréquence de retour du maïs : trois années sur quatre maximum	23 €/ha/an : différence entre la marge brute moyenne d'une rotation du type MMMB ou MMMS (490 €/ha/an) et des successions culturales de type MMMMMB*	100 % de la SCOP avec succession type MMMMMB (6 480 ha)
R2	Diminution de la fréquence de retour du maïs : deux années sur trois maximum	52 €/ha/an : différence entre la marge brute moyenne d'une rotation du type MMB ou MMS (461 €/ha/an) et des successions culturales de type MMMMMB*	100 % de la SCOP avec succession type MMMMMB (6 480 ha)
R3	Diminution de la fréquence de retour du maïs : d eux années sur cinq maximum	107-172 €/ha/an : différence entre la marge brute moyenne d'une rotation du type MMOTB (341 €/ha/an) et des successions culturales type du scénario A*	100 % de la SCOP (8 840 ha)

* Les successions types sur les secteurs de mise en œuvre des actions sont MMMMMB (marge brute moyenne de 513 €/ha/an) et MMB (marge brute moyenne de 448 €/ha/an).
B : blé ; M : maïs ; O : orge ; S : soja ; T : tournesol.
SCOP : surface en céréales et oléoprotéagineux.

production (P2) ont quant à elles une efficacité qui reste très limitée, et un ratio coût-efficacité globalement moins bon que les actions de type rotationnelles.

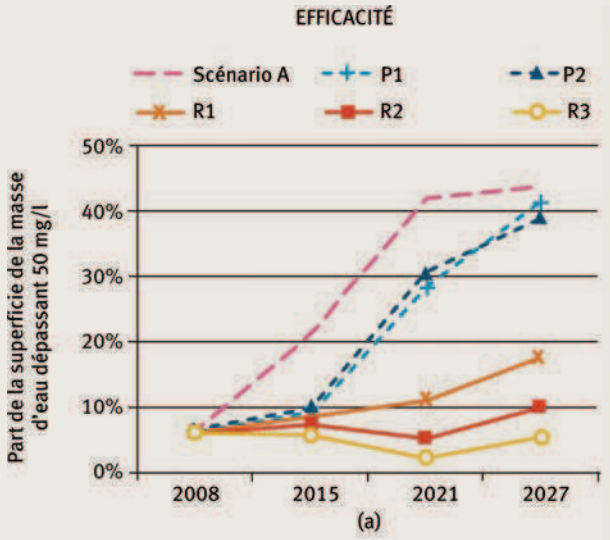
L'analyse spatiale plus fine des résultats de modélisation montre que les ratios coût-efficacité des actions sont meilleurs sur la partie située en rive gauche de l'Ain. La mise en œuvre de R2 uniquement sur cette partie entraînerait un coût de 223 000 euros par an, soit une réduction de 34 % par rapport à une mise en œuvre sur l'ensemble de la masse d'eau, pour une efficacité comparable.

Ces coûts sont cependant très fortement dépendants du cours des céréales et oléo-protéagineux : les variations des prix observés sur la période 1999-2007 engendreraient, par exemple, une variation des coûts de mise en œuvre de R2 de – 50 % à + 160 % autour de la moyenne.

Conclusion et perspectives

Ces travaux illustrent les incertitudes liées à l'évolution de la qualité des masses d'eau souterraine de type alluvial à l'horizon 2027, en réponse aux incertitudes associées à l'évolution de facteurs économiques, politiques et sociaux. Les implications en termes d'actions à mener pour respecter les objectifs de la DCE sont fortes. Le scénario d'évolution de l'agriculture qui apparaît ici comme le plus probable (scénario A) entraîne une dégradation de la qualité de la nappe alluviale de l'Ain et appelle à mettre en œuvre un programme d'actions pour réduire les pressions exercées par les nitrates. À l'opposé, si l'agriculture évoluait selon le scénario B, aucune action complémentaire ne serait nécessaire pour respecter les exigences de la DCE.

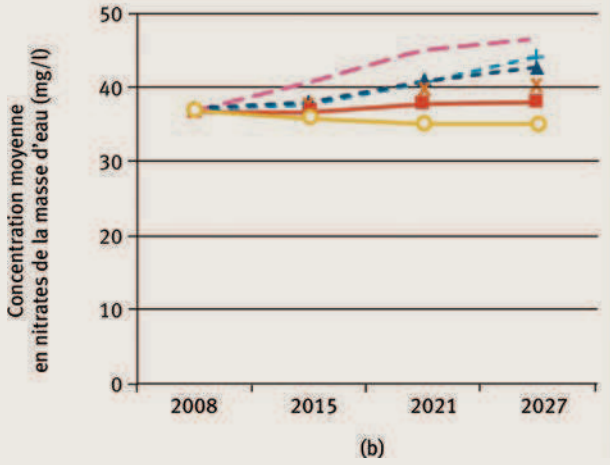
❸ Analyse coût-efficacité des actions (hypothèse de mise en œuvre sur l'ensemble de la masse d'eau) : (a) évolution de la part de la superficie de la masse d'eau dépassant 50 mg/l ; (b) évolution de la concentration moyenne à l'échelle de la masse d'eau ; (c) coût, efficacité, ratio coût-efficacité et classement des ratios de chaque action ; (d) représentation graphique des résultats.

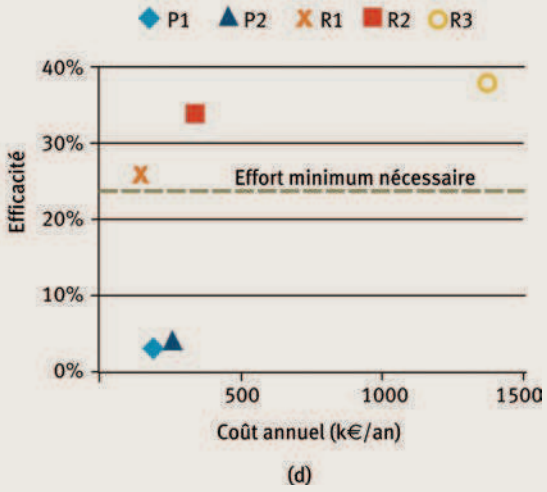


RATIO COÛT- EFFICACITÉ

Action	Coût (k€/an)	Efficacité (%)	Ratio C/E (k€/an/%)	Rang
P1	195	3	77	5
P2	259	4	58	4
R1	150	26	6	1
R2	339	34	10	2
R3	1366	38	36	3

(c)





Introduire une diversification des assolements par un plafonnement de la fréquence de retour du maïs à deux années sur trois maximum (action R2) permettrait, selon les résultats du modèle, d'infléchir les tendances et de restaurer la qualité de la masse d'eau du scénario A. Une mise en œuvre de cette action ciblée sur la partie en rive gauche de l'Ain serait suffisante et permettrait de réduire le coût de mise en œuvre de 34 %. Si un dispositif de type MAE devait être mis en place pour inciter à mettre en œuvre l'action R2, la compensation devrait être au moins égale au surcoût moyen de 52 euros par hectare de SCOP par an afin que celle-ci soit acceptable par les acteurs agricoles.

Cependant, aucun dispositif de ce type n'existe aujourd'hui. La MAE rotationnelle existante, qui se situe en termes d'exigence entre les actions R2 et R3, propose une compensation annuelle de 32 euros par hectare, bien inférieure aux surcoûts évalués pour R2 (52 euros par hectare) et R3 (de 107 à 172 euros par hectare). On peut également s'interroger sur la viabilité d'un instrument de type MAE, qui par sa durée limitée à cinq ans, ne garantit pas un changement durable des pratiques. Le scénario B montre qu'un changement plus global des systèmes de production, insufflé par une réorientation importante des politiques publiques, permettrait au contraire de garantir sur le long terme une bonne qualité chimique des eaux souterraines.

Cette synthèse apporte un éclairage méthodologique innovant sur la conduite d'une évaluation économique pour définir un programme d'actions visant à améliorer la qualité d'une masse d'eau souterraine dégradée par les nitrates d'origine agricole. La démarche scientifique pourrait être reproduite sur d'autres masses d'eau souterraine. Néanmoins, sa mise en œuvre systématique n'est pas envisageable pour des raisons de coûts et de délais. De plus, la mise en œuvre de la démarche nécessite des conditions locales privilégiées : une très bonne connaissance préalable du fonctionnement dynamique et de l'état chimique de la nappe, ainsi qu'une implication importante des acteurs locaux tant dans la collecte des données et la validation des hypothèses de travail, que dans la mise en œuvre de la démarche participative. La réalisation de quelques études de cas, représentatives de la diversité des situations agro-hydrogéologiques rencontrées en France, permettrait cependant de disposer d'études de référence éventuellement extrapolables à d'autres sites similaires de manière à aider à la préparation des seconds plans de gestion à mettre en œuvre en 2016. ■

Les auteurs

Cécile HÉRIVAUX
BRGM
Direction Eau, Environnement et Écotechnologies
Unité Nouvelles Ressources et Économie
1039 rue de Pinville – 34000 Montpellier
c.herivaux@brgm.fr

Laurence GOURCY
BRGM
Direction Eau, Environnement et Écotechnologies
2 avenue Claude Guillemin – BP 36009
45060 Orléans Cedex 2
l.gourcy@brgm.fr

Laurent CADILHAC
Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse
2 Allée de Lodz – 69007 Lyon
Laurent.CADILHAC@eaurmc.fr

En savoir plus...

GOURCY, L., SURDYK, N., THIERY, D., WINCKEL, A., CARY, L., AMRAOUI, N., 2008, *Caractérisation de l'inertie des systèmes aquifères vis-à-vis des apports diffus d'origine agricole. Application à l'aquifère de la plaine de l'Ain*, Rapport final de phase 1, BRGM/RP-56694-FR, 100 p.

GODET, M., ROUBELAT, F., 1996, Creating the future: the use and misuse of scenarios, *Long Range Planning*, 29 (2), p. 164-171.

HERIVAUX, C., SURDYK, N., BUSCARLET, E., ASFIRANE, F., GOURCY, L., 2012, *Analyse coût-efficacité spatialisée de programmes d'actions visant à restaurer le bon état de la nappe de l'Ain*, BRGM/RP-60624-FR, 84 p.

POUX, X., NARCY, J., CHENAT, V., 2005, *Agriculture et environnement : 4 scénarios à l'horizon 2025*, Groupe de la Bussière, Rapport pour le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, 132 p.

THIERY, D., 1995, *Modélisation 3D du transport de masse avec le logiciel MARTHE version 5.4*, BRGM-R-38463-DR/HYT95, 171 p.

THIERY, D., SEGUIN, J., 1985, *Modélisation globale des transferts de nitrates dans un bassin hydrogéologique pour prévoir l'évolution des concentrations dans les eaux souterraines – Description du modèle BICHE – Trois exemples d'application*, BRGM/85-SGN-663-EAU, 182 p.