



UNIVERSITÉ
BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ



région **BOURGOGNE
FRANCHE-COMTÉ**



Étude de l'état de santé des rivières karstiques en relation avec les pressions anthropiques sur leurs bassins versants.

Rapport de la tranche 2B

VOLET

Fonctionnement des sols agricoles du bassin versant

Pierre-Marie Badot, Eric Lucot, Etienne Chanez, François Degiorgi

14 novembre 2016

INTRODUCTION

Depuis plusieurs dizaines d'années, un faisceau de signes, mesures et observations montrent que les rivières de Franche-Comté subissent une érosion lente mais continue de leurs fonctions biologiques :

- des proliférations algales récurrentes ;
- des phénomènes de colmatages des fonds par des fines ou des feutrages organiques de plus en plus intenses ;
- des eaux en période de crue présentant fréquemment une teinte "chocolat" lorsque le débit dépasse le module ;
- une raréfaction voire une disparition d'espèces réputées sensibles (grands plécoptères, écrevisses pieds blancs, éphémères, trichoptères...) ;
- des captures de salmonidés par les pêcheurs montrant une nette tendance à la baisse ;
- une remontée des espèces médianes ou basales (comme l'ombre ou de nombreuses espèces d'insectes aquatiques) vers les secteurs apicaux ;
- ...

Cette évolution négative semble s'être affirmée, sinon accélérée, depuis peu. Des mortalités massives de salmonidés sont survenues en 2010 et 2011, notamment au moment de leur période de reproduction.

De tels processus d'altération ont également été observés sur d'autres cours d'eau calcaires franc-comtois. Dans le cas de la Loue, ces phénomènes ont été d'autant plus spectaculaires que cette rivière était parmi les moins perturbées et présentait des stocks de salmonidés encore très importants jusqu'en 2008. La Loue et ses affluents constituent un observatoire représentatif pour rechercher les origines de l'appauvrissement général des ressources écologiques des rivières karstiques.

Depuis juillet 2012, le laboratoire Chronoenvironnement (UMR 6249, CNRS/UFC/UBFC) a entrepris avec le soutien financier de l'agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, puis du conseil régional de Bourgogne - Franche-Comté et du conseil départemental du Doubs, un programme de recherches centré sur ce réseau hydrographique pour atteindre les objectifs suivants :

1. caractériser de manière approfondie l'état de santé actuel de la Loue et ses évolutions avec des méthodes plus précises que celles employées dans les suivis réglementaires de la qualité des eaux réalisés dans le cadre de la directive cadre sur l'eau ;

2. appréhender les mécanismes de perturbations des fonctions biologiques du cours d'eau par l'analyse conjointe des compartiments fluviaux et des principaux étages de l'édifice biologique ;
3. identifier les contaminants présents dans les différents compartiments de l'écosystème et leurs voies de transferts, hiérarchiser leurs impacts possibles, examiner leurs sources potentielles à l'échelle du bassin versant ;
4. explorer les relations existant entre l'évolution des activités socio-économiques du bassin versant de la Loue d'une part et la qualité des eaux et les capacités d'autoépuration de la rivière d'autre part.

La première tranche (tranche 1), réalisée entre juillet 2012 et fin 2014, et la deuxième tranche (tranche 2A) conduite de juillet 2012 à septembre 2015, ont permis de recueillir de nombreuses informations relatives à ces différents objectifs.

Au cours de la troisième tranche (tranche 2B), nous avons mis en place une étude lysimétrique du fonctionnement des sols agricoles du bassin versant en fonction de leurs caractéristiques propres et de leur mise en valeur agricole afin de caractériser les transferts de substances des sols vers les milieux aquatiques.

Ce volet fait l'objet d'un partenariat étroit avec la chambre d'agriculture du Doubs et du Territoire de Belfort (Didier Tourenne) en ce qui concerne le choix des exploitations, les contacts avec les agriculteurs et la sélection des parcelles.

Nous tenons également à adresser nos plus vifs remerciements aux agriculteurs ayant accepté l'installation des dispositifs lysimétriques sur leurs parcelles.

CARTOGRAPHIE DES SOLS

Introduction

La cartographie des propriétés des sols sur les bassins versants des résurgences de Plaisir Fontaine et du Bief Rouge a pour objectifs :

- de déterminer quels sont les sols les plus représentatifs pour y installer les dispositifs lysimétriques,
- de localiser ces sols pour les associer aux pratiques culturales,
- de connaître les proportions des différents types de sols pour extrapoler les résultats des analyses des eaux lysimétriques à l'échelle du bassin versant

Matériel et méthodes

Zones d'étude

Les bassins versants étudiés sont celui de la résurgence de Plaisir Fontaine située entre Trépot et Bonnevaux-le-Prieuré et celui de la résurgence du Grand Bief situé entre Lods et Épenoy (Figure 1).

La surface du bassin versant du Grand Bief est d'environ 4500 ha, dont environ 3000 ha de sols agricoles (Figure 2). Plusieurs traçages hydrologiques y ont été réalisés (Figure 3). Le substrat géologique est principalement un calcaire dur fissuré (J9). Le bassin versant de Plaisir Fontaine a une surface de 800 ha, dont environ 600 ha de sols agricoles (Figure 4). Le substrat géologique est un calcaire dur fissuré (J7).

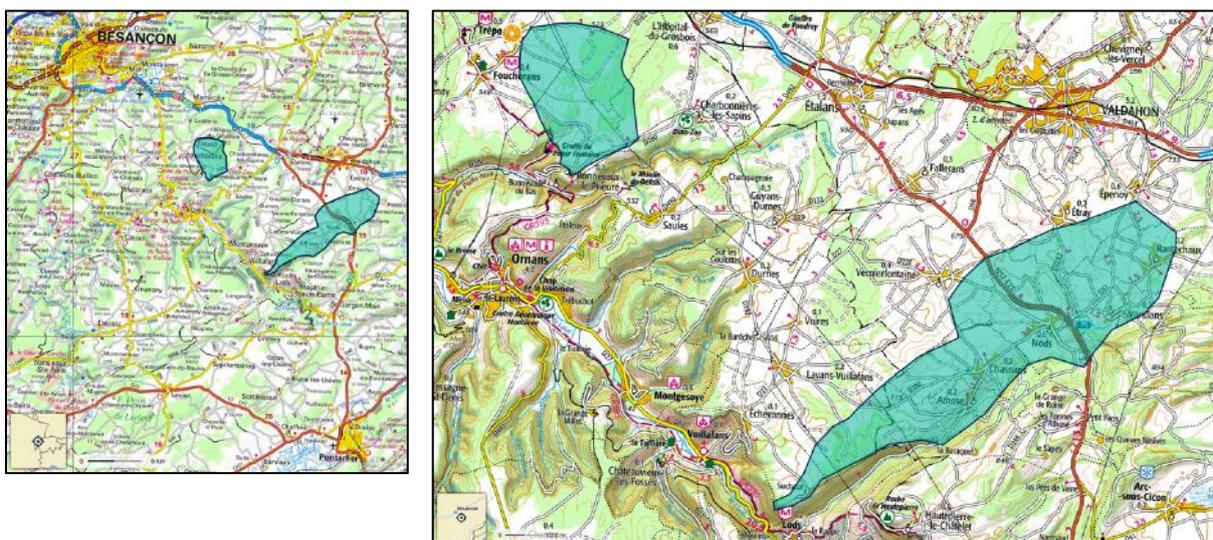


Figure 1. Localisation des deux bassins versants étudiés (en vert). Données cartographiques IGN.

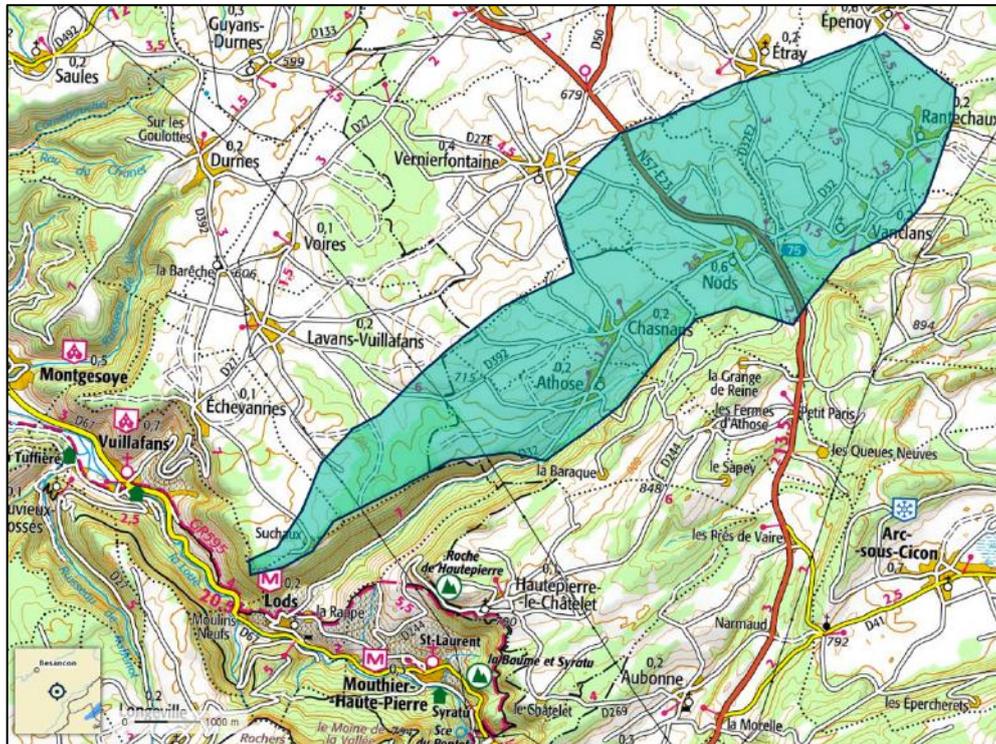


Figure 2. Zone cartographiée sur le bassin versant de la résurgence du Bief Rouge (Lods). Données cartographiques IGN.

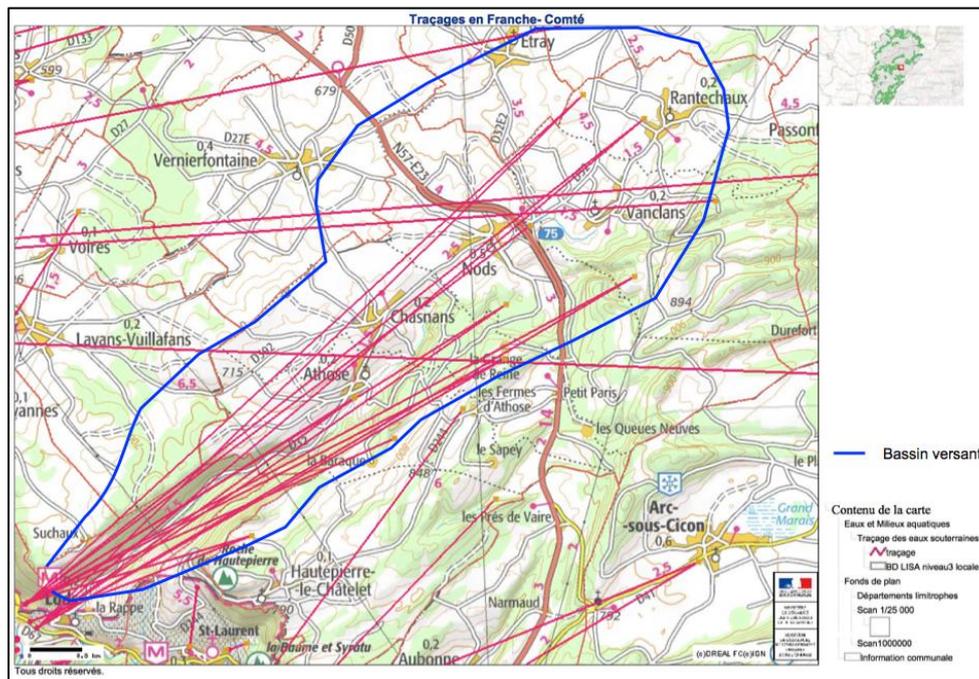


Figure 3. Tracéages hydrogéologiques sur le bassin versant de la résurgence du Grand Bief.

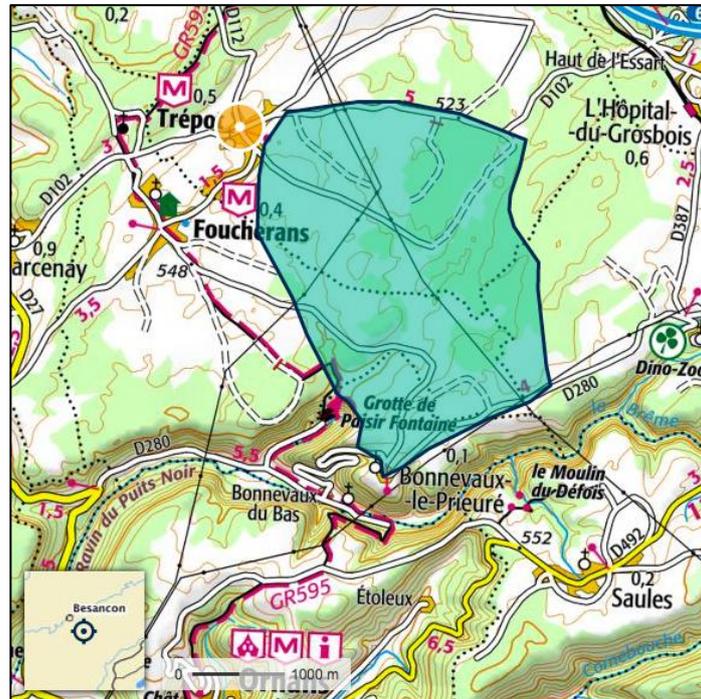


Figure 4. Zone cartographiée sur le bassin versant de la résurgence de la grotte de Plaisir Fontaine. Données cartographiques IGN.

Méthode de cartographie des sols

La cartographie des sols a pour objectif de représenter la distribution spatiale de leurs caractéristiques sous forme de surfaces homogènes (unités cartographiques). Dans les unités cartographiques, les caractéristiques des sols sont soit regroupées de manière synthétique (type de sol), soit présentées de manière individuelle (profondeur, quantité de matière organique, teneur en cailloux...).

À une échelle locale, la répartition des sols est déterminée par la distribution des facteurs qui influence leur formation et leur fonctionnement : la roche, la topographie, la végétation et le mode d'occupation du sol.

La méthode la plus efficace pour la réalisation d'une carte des sols à l'échelle d'un petit sous bassin versant comme ceux des résurgences de Lods ou de Plaisir Fontaine, est basée sur un zonage préalable et un échantillonnage stratifié (Legros, 1996)¹. Le zonage est déterminé par la combinaison des cartes de distribution des facteurs qui déterminent les changements des sols : la géologie (BRGM), la topographie (IGN) et l'occupation du sol (IGN et IFN). La délimitation des unités

¹ Legros JP., 1996. *Cartographie des sols. De l'analyse spatiale à la gestion des territoires*. Ed. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 321 p.

cartographiques s'appuie sur l'interprétation de ces cartes à partir des lois de distribution des sols :

- la loi des buttes, selon laquelle deux collines séparées par un vallon ont de fortes chances (80 %) d'être recouvertes par des sols différents,
- la loi des chaînes de sols qui permet de définir des successions de sols identiques entre le haut et le bas de pente dans des situations de topographie et de géologie semblables.

La carte prévisionnelle des unités cartographiques de sols qui conditionne la localisation des points à échantillonner est réalisée en superposant les cartes géologiques, topographiques et d'occupation du sol à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). La surface minimum des unités cartographiques est de 0,4 ha.

Pendant la prospection sur le terrain, un à trois sondages à la tarière pédologique sont réalisés dans chaque unité de la carte prévisionnelle. Le nombre de sondages par unité prévisionnelle dépend de sa surface, de l'hétérogénéité de la topographie et de l'occupation du sol.

Les sols sont étudiés jusqu'à la roche et au maximum jusqu'à 120 cm de profondeur (Figure 4) à partir d'une description morphologique.

La description morphologique est basée sur un ensemble de critères standardisés (Baize et Jabiol, 2011)² : la profondeur de chaque horizon, la texture (proportions des argiles, limons et sables), l'abondance de la matière organique humifiée, la couleur (codage Munsell), la présence d'éléments grossiers, les traces d'activité biologique, la porosité et l'effervescence du sol à l'acide chlorhydrique (HCl) pour mettre en évidence la présence de calcaire).

Sur le bassin versant de Plaisir Fontaine, 180 sondages ont été réalisés (1 sondage pour 4,4 ha) et 510 sur celui du Grand Bief (1 sondage pour 4,3 ha). En moyenne, il est possible de réaliser une quinzaine de sondages par jour, soit 13 jours de travail de terrain sur le bassin de Plaisir Fontaine et 35 jours sur celui du Grand Bief. Sur le terrain, les limites des unités cartographiques sont vérifiées et affinées à partir de critères visuels (topographie, végétation, aspect de la surface du sol).

² Baize D., Jabiol B., 2011. Guide pour la description des sols. Éd. Quæ, 429 p.



Figure 4. Reconstitution d'un profil de sol prélevé avec la tarière pédologique pour la description morphologique. Cliché É. Lucot

Après la phase de terrain, toutes les données acquises sont intégrées dans la base de données du SIG. Après analyse des données, les caractéristiques des sols déterminées à partir des sondages sont attribuées aux unités cartographiques correspondantes. Les limites définitives des unités cartographiques sont déterminées à partir de l'ensemble de ces informations.

Résultats et discussion

Carte des sols du bassin versant du Grand Bief (Lods)

Les sols brunifiés faiblement acides de profondeur faible à moyenne (sols bruns à pellicule calcaire et sols bruns eutrophes) sont très majoritaires sur la bassin versant du Grand Bief (Figures 5 et 6). Les sols avec une nappe d'eau (sols hydromorphes) sont rares, de même que les sols carbonatés (sols calcaires).



Figure 5. Sols représentatifs des bassins versants étudiés : de gauche à droite, sol brun eutrophe, sol brun à pellicules calcaires, sol brun calcaire, sol brun profond de doline. Clichés É. Lucot.

Les sols de profondeur inférieure à 20 cm représentent 35 % de la surface des sols agricoles et les sols de profondeur comprise entre 20 et 60 cm en représentent 45 %.

La proportion des sols de profondeur supérieure à 60 cm atteint 20 % (Figure 7).

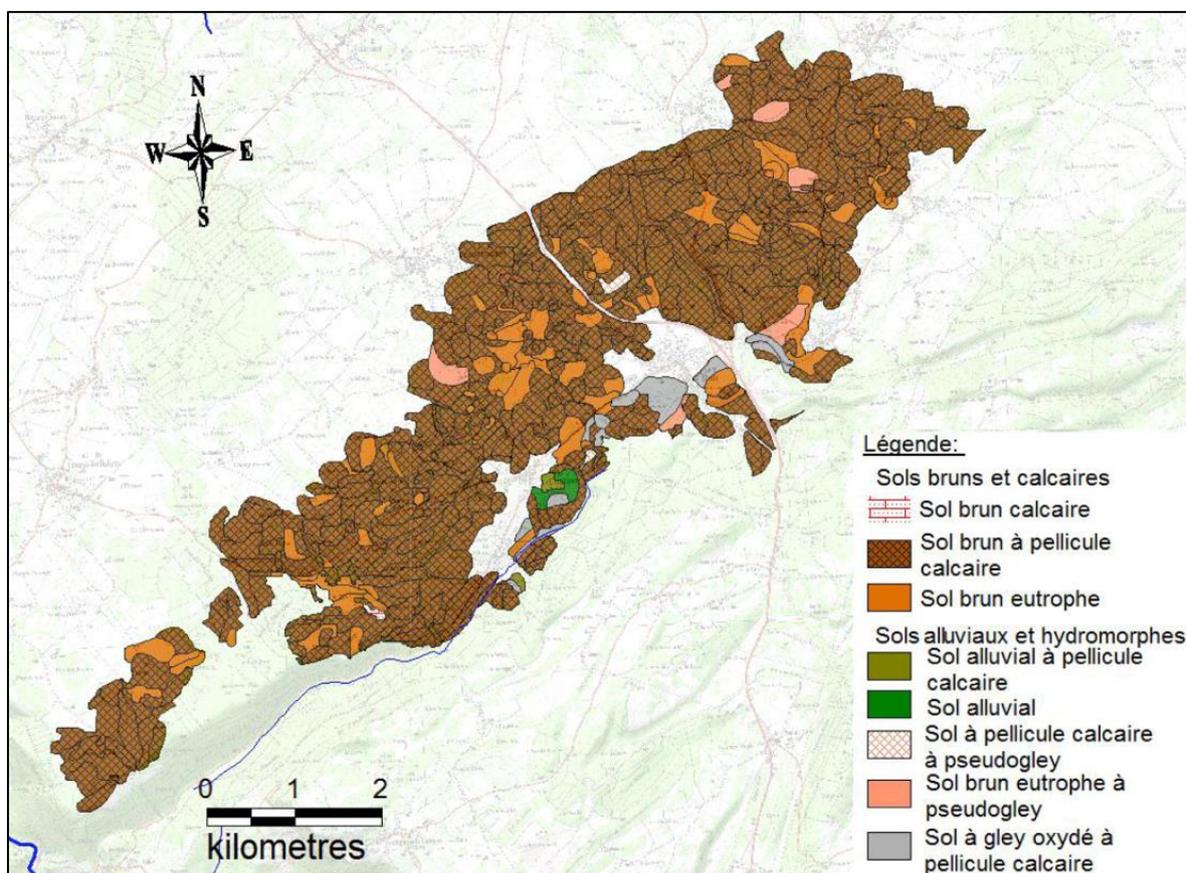


Figure 6. Carte des types de sols des zones agricoles du bassin versant du Grand Bief à Lods. Fond cartographique IGN.

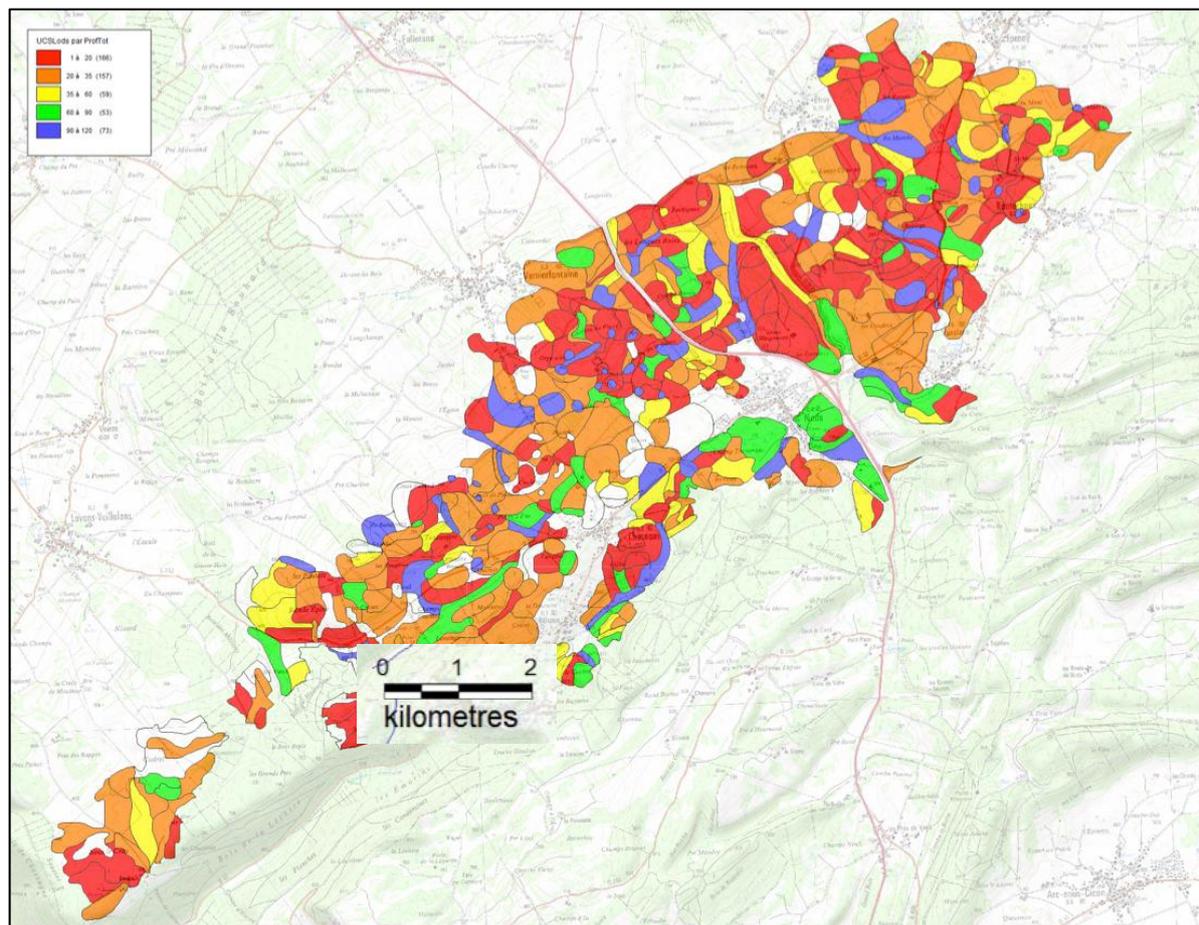


Figure 7. Carte de la profondeur des sols des zones agricoles du bassin versant du Grand Bief à Lods. Fond cartographique IGN.

La majorité des sols possèdent des textures de surface dominées par les limons avec une faible teneur en argile, les textures s'équilibrent en profondeur et se retrouvent parfois dominées par les argiles à proximité de la roche (Figure 8).

L'abondance de la matière organique dans le premier horizon est moyenne. La majorité des sols contiennent des éléments grossiers. Pour 60 % de la surface cartographiée, les cailloux apparaissent dès les 5 premiers centimètres de sol et des cailloux sont présents avant la roche dans plus de 80 % de la surface cartographiée.

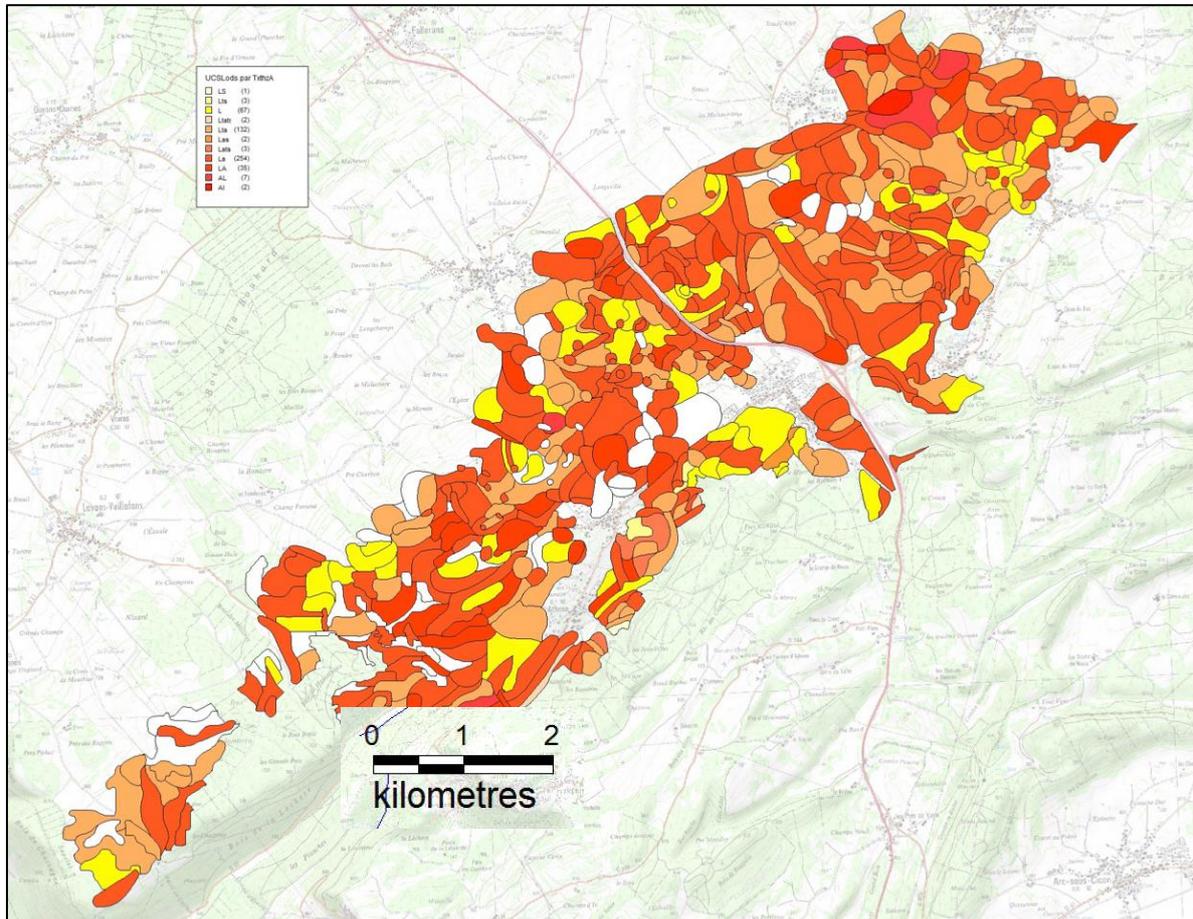


Figure 8. Carte de la texture de surface des sols des zones agricoles du bassin versant du Grand Bief à Lods. Fond cartographique IGN.

La carte des propriétés des sols de la résurgence du Grand Bief permet de définir les deux types de profils de sol dominants qui sont :

- les sols très superficiels (≤ 20 cm), de texture limono-argileuse en surface, avec une abondance moyenne de matière organique dans le 1^{er} horizon, des cailloux et sans hydromorphie ;
- les sols superficiels à moyennement profonds (20 à 60 cm), de texture limono-argileuse en surface, avec une abondance moyenne de matière organique dans le 1^{er} horizon, des cailloux et sans hydromorphie.

Carte des sols du bassin versant de Plaisir Fontaine

Les sols brunifiés faiblement acides de profondeur faible à moyenne (sols bruns à pellicule calcaire et sols bruns eutrophes) sont très majoritaires sur la partie agricole du bassin versant de Plaisir Fontaine (Figure 9). Les sols carbonatés (sols calcaires)

sont peu répandus. Les sols avec une nappe d'eau (sols hydromorphes) sont absents.

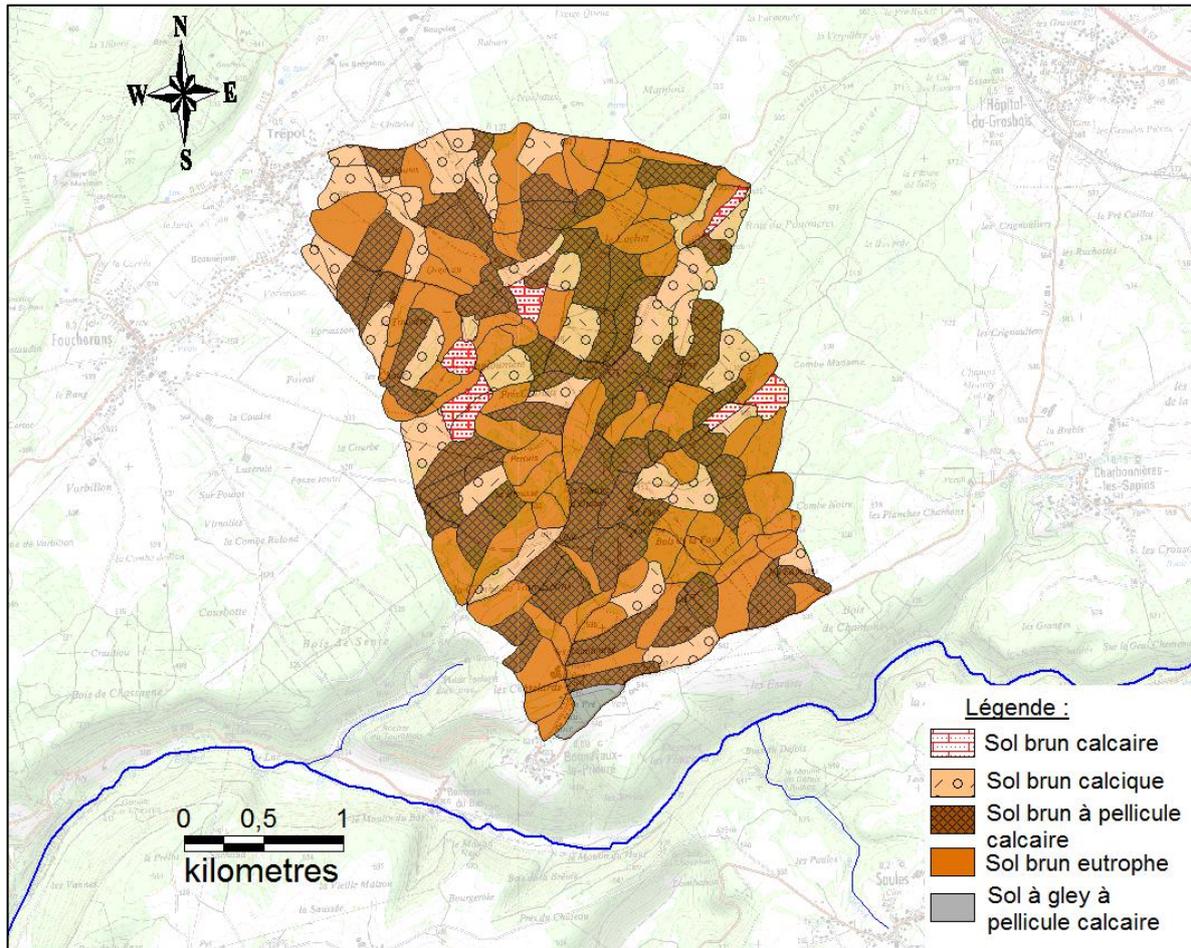


Figure 9. Carte des types de sols des zones agricoles du bassin versant de Plaisir Fontaine. Fond cartographique IGN.

Les sols de profondeur inférieure à 20 cm représentent 35 % de la surface des sols agricoles, les sols de profondeur comprise entre 20 et 60 cm en représentent 47 % et la proportion des sols de profondeur supérieure à 60 cm atteint 18 % (Figure 10).

Ces proportions sont très proches de celles obtenues sur le bassin versant du Grand Bief. Il en est de même pour les autres caractéristiques des sols comme la texture de l'horizon de surface, l'abondance de la matière organique et la présence de cailloux. Les sols hydromorphes sont absents.

Les deux types de sols les plus représentés sont très proches de ceux définis sur le bassin versant du Grand Bief.

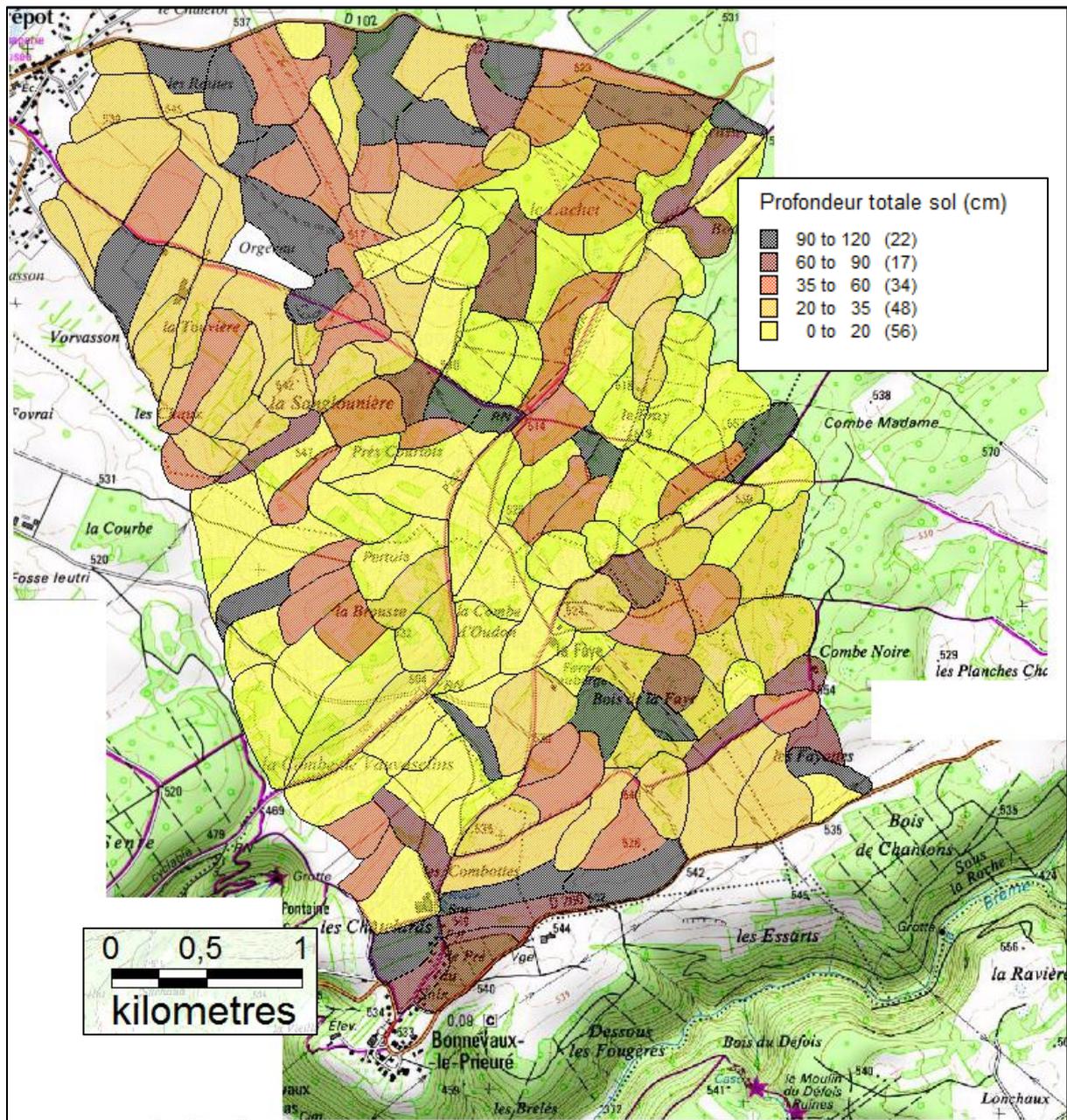


Figure 10. Carte des profondeurs des sols des zones agricoles du bassin versant de Plaisir Fontaine. Fond cartographique IGN.

SUIVI DE LA QUALITÉ DES EAUX DE PERCOLATION DES SOLS

Introduction

L'eau qui traverse les sols et qui circule ensuite dans les fissures des roches et les réseaux karstiques jusqu'au cours d'eau est l'eau de pluie qui n'a pas été retenue par les sols. Cette eau gravitaire circule dans la porosité des sols et se charge d'éléments en solution et de particules en contact avec les constituants minéraux et organiques du sol.

Pour récolter cette eau (ou solution du sol) en vue de l'analyser, il est nécessaire d'utiliser une méthode passive : les plaques lysimétriques.

Matériel et méthodes

Les plaques lysimétriques

Les plaques sont fabriquées en polypropylène homopolymère (PPH) qui est très stable (agrée contact alimentaire) et rigide. Leur surface de collecte est de 0,26 m². Elles sont munies d'une gouttière terminée par un raccord pour le tuyau de collecte (Figure 11).



Figure 11. Plaque lysimétrique en polypropylène homopolymère PPH. Photographie de droite : raccord entre la gouttière et le tuyau. Clichés É. Lucot.

Grâce à leur inclinaison, elles collectent l'eau de percolation, qui est dirigée par gravité dans un récipient de récolte situé en contrebas dans une fosse maintenue ouverte. Elles sont recouvertes d'un géotextile inerte qui limite le colmatage de la gouttière et favorise la continuité de l'écoulement entre le sol et la plaque (Figures 12 et 13).

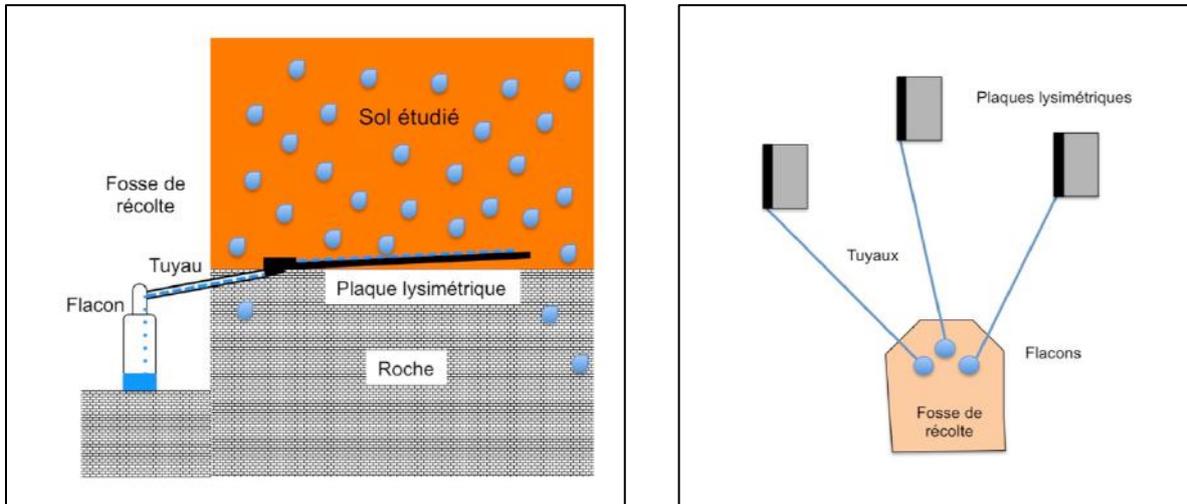


Figure 12. Principe d'installation des plaques lysimétriques. Vue latérale à gauche, vue du dessus à droite.



Figure 13. Plaque lysimétrique en cours d'installation dans un sol très superficiel. Au premier plan, le raccord du tuyau de récolte. Cliché É. Lucot.

L'installation d'un lysimètre nécessite l'ouverture d'une fosse où la plaque est installée, d'une tranchée pour le tuyau d'évacuation de l'eau et d'une fosse où est placé le bidon de récolte (Figure 14).

Le sol est reconstitué horizon par horizon au-dessus de la plaque et tassé légèrement. La tranchée est également rebouchée.

La fosse où sont placés les bidons de récolte est stabilisée et recouverte de plaques

pour la protéger des intempéries et du soleil.



Figure 14. Étapes de l'installation de plaques lysimétriques. Clichés É. Lucot.

Localisation des dispositifs lysimétriques

Les critères pris en compte pour le choix de la localisation des dispositifs lysimétriques sont le type de sol, le mode d'occupation du sol et la pratique de fertilisation.

Le choix des exploitations, les contacts avec les agriculteurs et la sélection des parcelles ont été réalisés en collaboration avec la chambre d'agriculture du Doubs et du Territoire de Belfort (Didier Tourenne).

Deux types de sols ont été sélectionnés parmi les sols les plus représentés :

- les sols non hydromorphes de moins de 25 cm de profondeur avec une texture de surface limono-argileuse, une abondance de matière humifiée moyenne et des éléments grossiers,
- les sols non hydromorphes de 50 à 60 cm de profondeur avec une texture de surface limono-argileuse, une abondance de matière humifiée moyenne et des éléments grossiers.

Deux modes d'occupation du sol et de pratique culturale ont été retenus :

- les prairies permanentes de fauche,
- les cultures de céréales d'hiver après retournement (labour) de la prairie et poursuite de la culture pendant 3 ans, avant le retour à la prairie.

Les pratiques de fertilisation des prairies et des cultures les plus représentées combinent les apports de fumier, de lisier et d'engrais minéraux, mais les proportions, les doses et les dates d'apport peuvent varier fortement d'une exploitation à l'autre. Il n'est donc pas possible de sélectionner des situations strictement identiques à l'échelle des petits bassins versants étudiés.

Il a été convenu avec les agriculteurs qu'ils noteraient les types, la quantité et la date de chaque apport de fertilisant. La situation idéale étant de pouvoir installer toutes les modalités sur les parcelles d'une même exploitation.

Les différentes combinaisons de modalités étudiées sont :

- sol moyennement profond sous prairie permanente,
- sol moyennement profond sous culture après retournement de prairie,
- sol très superficiel sous prairie permanente,
- sol très superficiel sous culture après retournement de prairie.

Trois plaques ont été installées dans chaque situation pour disposer de répétitions, soit un total de 12 plaques dans chacun des deux bassins versants.

Sur le bassin versant du Grand Bief, les 12 plaques sont installées sur 2 parcelles d'une même exploitation sur la commune de Chasnans (Figure 15).



Figure 15. Localisation des 12 plaques lysimétriques à Chasnans au lieu-dit l'Oserole. Chaque repère correspond à 3 plaques. Repères orange : sols moyennement profonds (prairie ou culture), repères marron : sols très superficiels (prairie ou culture). Fond cartographique IGN.

Sur le bassin versant de Plaisir Fontaine, 6 plaques sont installées sur 2 parcelles d'une même exploitation sur la commune de Bonnevaux-le-Prieuré et 6 plaques sur une même parcelle à Trépot (Figure 16).

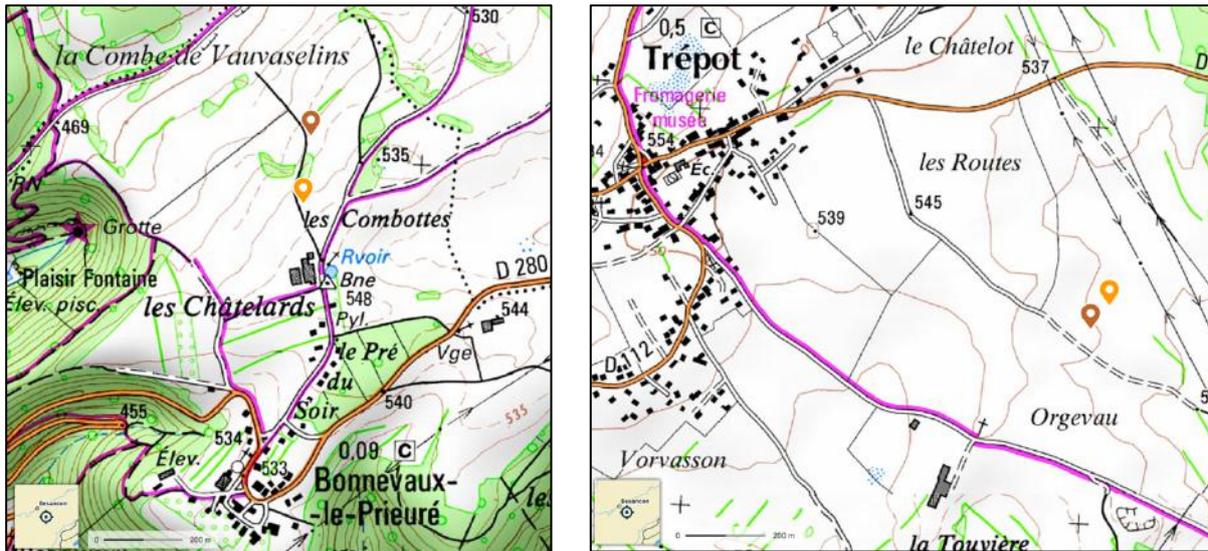


Figure 16. Localisation des plaques lysimétriques à Bonnevaux-le-Prieuré et à Trépot. Chaque repère correspond à 3 plaques. Repères orange : sols moyennement profonds (prairie ou culture), repères marron : sols très superficiels (prairie ou culture). Fond cartographique IGN.

L'installation d'un troisième site est à l'étude. Le site sera mis en place dès que les dispositifs actuellement en place auront produit suffisamment de données pour permettre de raisonner les choix à effectuer entre différentes stratégies d'échantillonnage possibles.

Nous pouvons par exemple viser à mieux couvrir l'éventail de situations possibles en explorant le comportement de sols profonds ou les pratiques de fertilisation. Une autre option consisterait à répliquer les situations actuellement étudiées pour cerner la variabilité inhérente aux mesures en cours et pour asseoir leur extrapolation à l'échelle du bassin versant.

Il importera dans tous les cas d'avoir une représentativité suffisamment grande des différents types de situations existantes pour être en mesure de proposer des extrapolations réalistes basées notamment sur les surfaces occupées par les différents types de sols et les différentes modalités de mise en valeur.

En fonction des critères retenus, il conviendra aussi d'identifier un ou plusieurs agriculteurs volontaires.

ETUDE DES TRANSFERTS A TRAVERS LES SOLS SOUS PARCELLES AGRICOLES

La mise en place de systèmes lysimétriques dans les bassins versants retenus (Plaisir Fontaine, Grand Bief) permet de recueillir l'eau de percolation susceptible de rejoindre les écosystèmes aquatiques via les systèmes karstiques.

Analyses et modalités de suivi

Analyses usuelles

Les eaux lysimétriques collectées sont systématiquement analysées. Les paramètres suivants ont été déterminés sur chaque échantillon collecté (Tableau 1). Ces analyses de routine sont confiées au laboratoire Qualio (UFC) qui bénéficie des accréditations *ad hoc* pour ces paramètres :

- nitrates (mg L^{-1})
- carbone organique total (mg L^{-1})
- pH
- matières en suspension (mg L^{-1})
- couleur
- conductivité ($\mu\text{S cm}^{-2}$)
- nitrites (mg L^{-1})
- phosphore total (mg L^{-1})
- azote Kjeldahl (mg L^{-1})
- Ca (mg L^{-1})
- Mg (mg L^{-1})
- ammonium (mg L^{-1})
- DBO5 (mg L^{-1})
- bicarbonate (mg L^{-1})

Dans chaque site, 4 modalités sont étudiées et donnent lieu chacune à 3 réplicats. Au total, ce sont donc 12 plaques lysimétriques qui sont installées par site.

- CP : culture profonde,
- CS : culture superficielle,
- PP : prairie profonde,
- PS : prairie superficielle.

Tableau 1. Paramètres physico-chimiques analysés dans les eaux lysimétriques : nitrates (NO₃), carbone organique total (COT), pH, matières en suspension (MES), couleur, conductivité, nitrites (NO₂), phosphore total (PT), azote Kjeldahl (NK), calcium (Ca), magnésium (Mg), ammonium (NH₄), demande biochimique en oxygène (DBO₅), bicarbonate.

Site du Grand Bief. Nombre d'analyses effectuées par paramètres (laboratoire Qualio) et par modalités CP : culture profonde ; CS : culture superficielle ; PP : prairie profonde et PS : prairie superficielle, n= 3 réplicats pour chaque modalité (ex. : CP1, CP2, CP3).

Modalités	NO ₃ (mg L ⁻¹)	COT (mg L ⁻¹)	pH	MES (mg L ⁻¹)	Couleur	Conductivité (μS cm ⁻²)	NO ₂ (mg L ⁻¹)	PT (mg L ⁻¹)	NKJ (mg L ⁻¹)	Ca (mg L ⁻¹)	Mg (mg L ⁻¹)	NH ₄ (mg L ⁻¹)	DBO ₅ (mg L ⁻¹)	Bicarbonate (mg L ⁻¹)
CP1	8	6	8		4	5	8	8	7	8	8	8	5	7
CP2	14	12	14		11	10	14	14	12	14	14	14	12	13
CP3	19	14	16	2	14	13	19	17	14	18	18	18	13	14
CS1	20	14	18	2	12	14	20	18	16	18	18	20	13	16
CS2	22	20	23	1	15	18	22	21	18	21	21	23	16	20
CS3	25	24	25	1	18	20	25	25	24	24	24	24	22	22
PP1	13	11	13	2	9	10	12	13	13	13	13	13	10	11
PP2	6	5	5	4	5	5	6	5	5	5	5	6	5	4
PP3	4	3	4	2	4	4	4	4	3	4	4	4	2	3
PS1	25	23	25	5	19	20	25	25	23	25	25	25	22	23
PS2	23	19	22	5	15	18	23	21	19	20	20	23	17	19
PS3	3	3	3	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3
total	195	167	189	27	139	150	194	187	170	186	186	194	152	166

Analyses spécifiques

Parallèlement, aux analyses de routine confiées à Qualio, nous analysons au sein du laboratoire Chronoenvironnement les paramètres chimiques suivants :

HCO ₃ mg/l	F mg/l	Cl mg/l	NO ₂ mg/l	Br mg/l	NO ₃ mg/l	PO ₄ mg/l	SO ₄ mg/l
Titration	IC	IC	IC	IC	IC	IC	IC

Ca mg/l	K mg/l	Mg mg/l	Na mg/l	Si mg/l	DOC mg/l	Al μg/l	As μg/l
ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	ICP-AES	CatOx-NDIR	ICP-MS	ICP-MS

B	Ba	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo
---	----	----	----	----	----	----	----	----

$\mu\text{g/l}$								
ICP-MS								
Ni	P	Pb	Rb	Sc	Sn	Sr	Ti	U
$\mu\text{g/l}$								
ICP-MS	ICP-AES	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-MS	ICP-AES	ICP-MS	ICP-MS
V	Y	Zn	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
$\mu\text{g/l}$								
ICP-MS								
Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
$\mu\text{g/l}$								
ICP-MS								

Fréquence d'échantillonnage

Au cours de la phase initiale, nous avons fait le choix de relever systématiquement les dispositifs après chaque précipitation significative. Cette manière de procéder est très exigeante en matière de coût et de temps de travail, mais elle a été retenue car elle autorise le recueil des données nécessaires pour valider l'efficacité et le bon fonctionnement des installations.

L'autre intérêt majeur réside dans la possibilité de réaliser un échantillonnage aussi complet que possible, sans risque de manquer des événements potentiellement importants en termes de transferts. Cette stratégie de recueillir et d'analyser systématiquement l'eau lysimétrique récoltée a été retenue après consultation de la Chambre d'agriculture. Elle permettra d'établir le suivi le plus fin possible et d'enregistrer l'ensemble des flux transférés par les sols. Pour disposer d'informations solides, il importe en effet de s'assurer que tous les événements ponctuels liés aux pratiques agricoles et/ou aux conditions météorologiques et pouvant engendrer des transferts intenses vers les milieux souterrains et aquatiques sont bien pris en compte dans l'échantillonnage.

Le Tableau 2 présente le nombre d'échantillons récoltés par modalités (3 réplicats par modalités) depuis la mise en place des plaques en septembre 2015 à Chasnans (sous bassin versant de la Source du Grand Bief à Lods). Sur l'ensemble de la période de prélèvement c'est-à-dire du 23/11/2015 au 26/10/2016, 26 prélèvements ont été effectués (soit en moyenne un prélèvement tous les 12 jours).

Les plaques en sols superficiels ont permis de récolter plus d'eau que celles disposées en sols profonds (24 à 26 prélèvements en sols superficiels contre 16 à 23 prélèvements en sols profonds). Le nombre de prélèvements effectués est variable en fonction de la quantité de précipitation tombée sur la zone d'étude. Plusieurs fois, les précipitations ont été insuffisantes pour récupérer de l'eau en sols profonds mais suffisamment abondantes pour en récupérer en sols superficiels ce qui explique les disparités entre ces deux modalités. On observe également que certains réplicats ont très peu produits par rapport aux autres (la plaque CP1 et la plaque PS3 ont par exemple permis de récolter seulement 9 et 3 prélèvements respectivement).

Tableau 2 : Nombre d'échantillons récoltés dans le dispositif de Chasnans par date et par modalités (CP : culture profonde ; CS : Culture superficielle ; PP : prairie profonde et PS : prairie superficielle) ; 3 réplicats à chaque fois (ex. : CP1, CP2, CP3)

Date	CP1	CP2	CP3	CS1	CS2	CS3	PP1	PP2	PP3	PS1	PS2	PS3	total
23/11/2015	1	1	1	1	1	1	1			1	1	1	10
02/12/2015			1	1	1	1				1	1		6
11/01/2016	1	1	1	1	1	1	1			1	1		9
29/01/2016			1		1	1				1	1		5
01/02/2016	1	1	1	1	1	1	1			1	1	1	10
08/02/2016				1	1	1				1	1		5
15/02/2016		1	1	1	1	1	1			1	1		8
26/02/2016		1	1	1	1	1	1			1	1		8
15/03/2016	1	1	1	1	1	1	1			1	1		9
07/04/2016	1	1	1	1	1	1	1			1	1		9
14/04/2016			1	1	1	1				1	1		6
18/04/2016	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1		10
27/04/2016		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		10
03/05/2016		1	1	1	1	1				1	1		7
17/05/2016	1	1	1	1	1	1	1			1	1		9
20/05/2016		1	1	1	1	1				1	1		7
26/05/2016				1	1	1				1	1		5
01/06/2016		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		10
09/06/2016			1	1	1	1	1	1		1	1		8
15/06/2016		1	1		1	1				1	1		6
23/06/2016			1	1	1	1	1			1	1		7
30/06/2016	1	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	11
25/07/2016			1	1	1	1				1	1		6
08/08/2016		1	1	1	1	1			1	1	1		8
21/09/2016		1	1	1	1	1	1	1		1	1		9
26/10/2016	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		11
Total	9	18	23	24	26	26	16	7	5	26	26	3	209

Au vu de la variabilité des volumes récupérés au sein d'un même triplicat, il a été décidé de ne pas regrouper (pool) les échantillons pour analyse. Les analyses ont donc été réalisées sur chaque volume d'eau récupéré. Au total sur les 26 prélèvements réalisés, 209 bidons d'eau (de volume variable) ont pu être récupérés et analysés. Les volumes récoltés étaient parfois insuffisants pour réaliser l'ensemble des analyses. Certains paramètres n'ont donc pas pu être analysés à certaines dates et pour certaines modalités (comme la DBO5 avec 152 analyses, Tableau 1) alors que d'autres ont pu être dosés quasi systématiquement (exemple nitrates, 195 analyses, Tableau 1).

Le dispositif mis en place à Plaisir Fontaine a été installé au cours de l'été 2016. Il est pleinement équipé depuis le début de l'automne 2016 (Figure 17).



Figure 17. Travaux d'installation du dispositif de Plaisir Fontaine (crédit photographique, E. Lucot)

PREMIERS RESULTATS DE L'ETUDE DES TRANSFERTS A TRAVERS LES SOLS SOUS PARCELLES AGRICOLES³

Après la mise en place des plaques lysimétriques, il est nécessaire de laisser s'écouler un temps suffisant afin que le sol, perturbé par l'installation malgré toutes les précautions méthodologiques prises, retrouve sa stabilité et son fonctionnement antérieur.

L'analyse et la validation méthodologique définitive des données déjà acquises et à acquérir pourront être conduites qu'à l'issue d'une période correspondant à la durée de stabilisation (de l'ordre de quelques semaines à quelques mois) prolongée d'au moins un cycle annuel complet à partir de cette stabilisation, de telle sorte que les effets de l'exploitation agricole des parcelles concernées puissent être pris en compte.

Le dispositif installé à Chasnans fonctionne depuis l'automne 2015 soit environ une année. Les premiers résultats présentés ici n'ont pas vocation à être totalement représentatifs de la masse de données en cours d'acquisition. Ce volet du programme ne prendra sa pleine signification qu'à l'issue de la réalisation de la tranche 3.

Les Figures 18 à 21 présentent les variations des concentrations en nitrates dans les eaux lysimétriques des sols superficiels (Figures 18 et 19) et des sols profonds (Figures 20 et 21) pour la modalité culture. Les concentrations montrent des pics de l'ordre de 400 à 500 mg L⁻¹ lors des premiers prélèvements en novembre et décembre 2015, concentrations qui s'atténuent ensuite progressivement. Les niveaux observés pendant la saison sont ensuite de l'ordre de quelques mg L⁻¹ à 10 mg L⁻¹ au printemps et au début de l'été. Des concentrations sont observées en avril et en mai, ce qui semble correspondre à la fertilisation minérale apportée sur la parcelle.

Pour les sols sous prairies (Figures 22 à 25), on observe des variations analogues. Toutefois, les pics observés au début de la mauvaise saison sont moins élevés (de l'ordre de 200 mg L⁻¹). De la même manière, les concentrations de nitrates dans les eaux lysimétriques recueillies sous prairie pendant la période de croissance végétale de mars à octobre, sont plus faibles que celles enregistrées sous culture et sont de l'ordre de quelques mg L⁻¹. Les pics printaniers ne sont pas retrouvés sur les dispositifs en prairie.

Lorsque l'on compare les sols profonds et les sols superficiels pour la même modalité (culture ou prairie), les premiers résultats indiquent que les teneurs en nitrates sont plus fortes sous sol superficiel.

³ Seuls les premiers résultats relatifs aux nutriments sont présentés ici. L'ensemble des résultats acquis et à acquérir sera analysé et discuté de manière approfondie lorsque le jeu de données disponibles sera suffisant (cf. texte).

Nitrates

Culture en sol superficiel

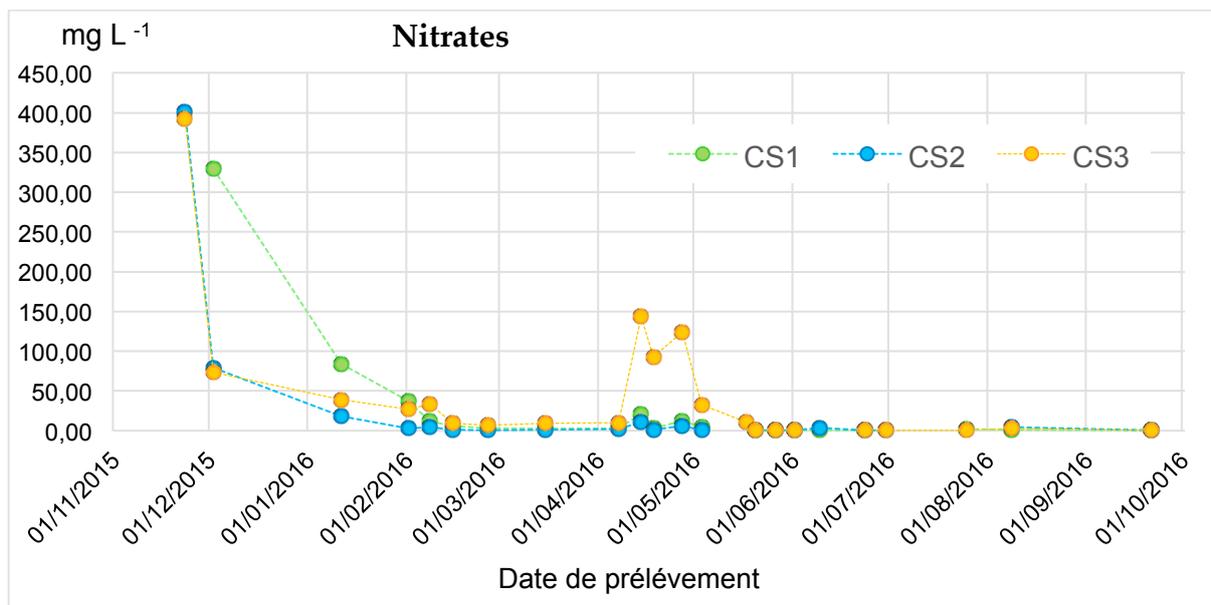


Figure 18. Concentrations en nitrate mesurées dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol superficiel pour la modalité culture, n = 3 réplicats, CS1 à CS3

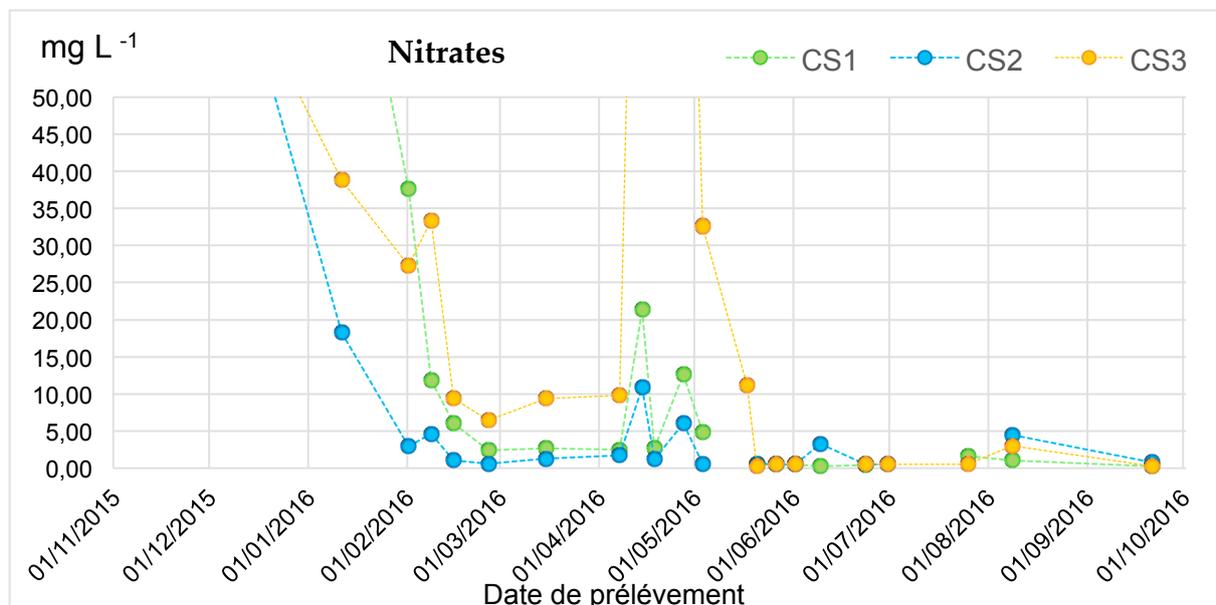


Figure 19. Détail des données représentées dans la Figure 18 pour les concentrations inférieures à 50 mg L⁻¹ : concentrations en nitrate mesurées dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol superficiel pour la modalité culture, n = 3 réplicats, CS1 à CS3

Culture en sol profond

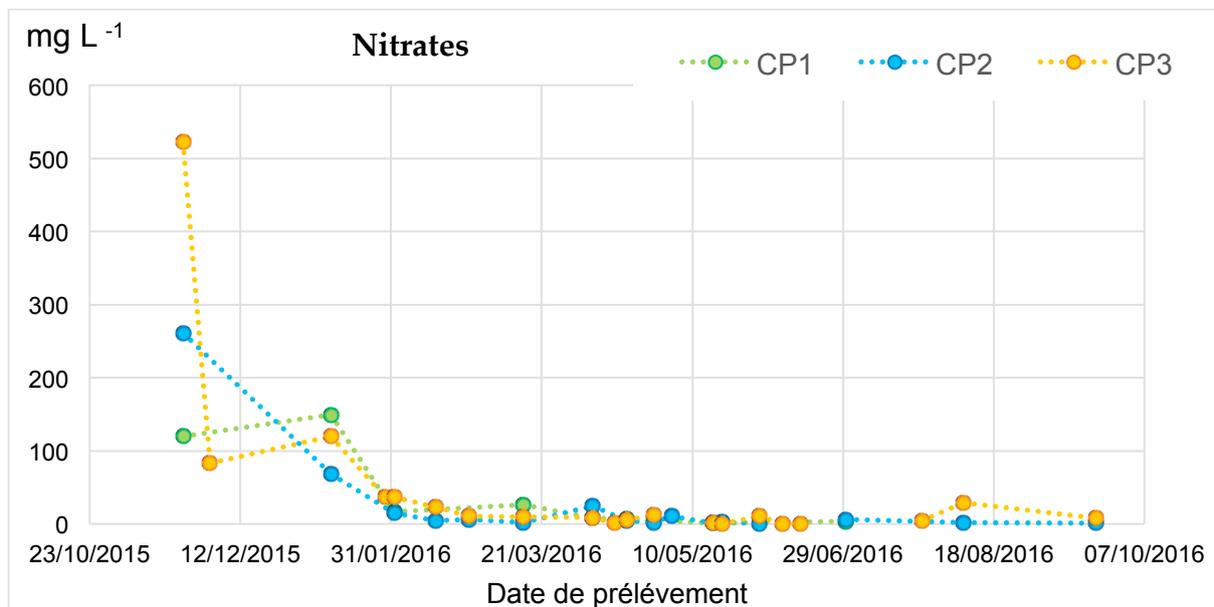


Figure 20. Concentrations en nitrate mesurées dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol profond pour la modalité culture, n = 3 réplicats CP1 à CP3

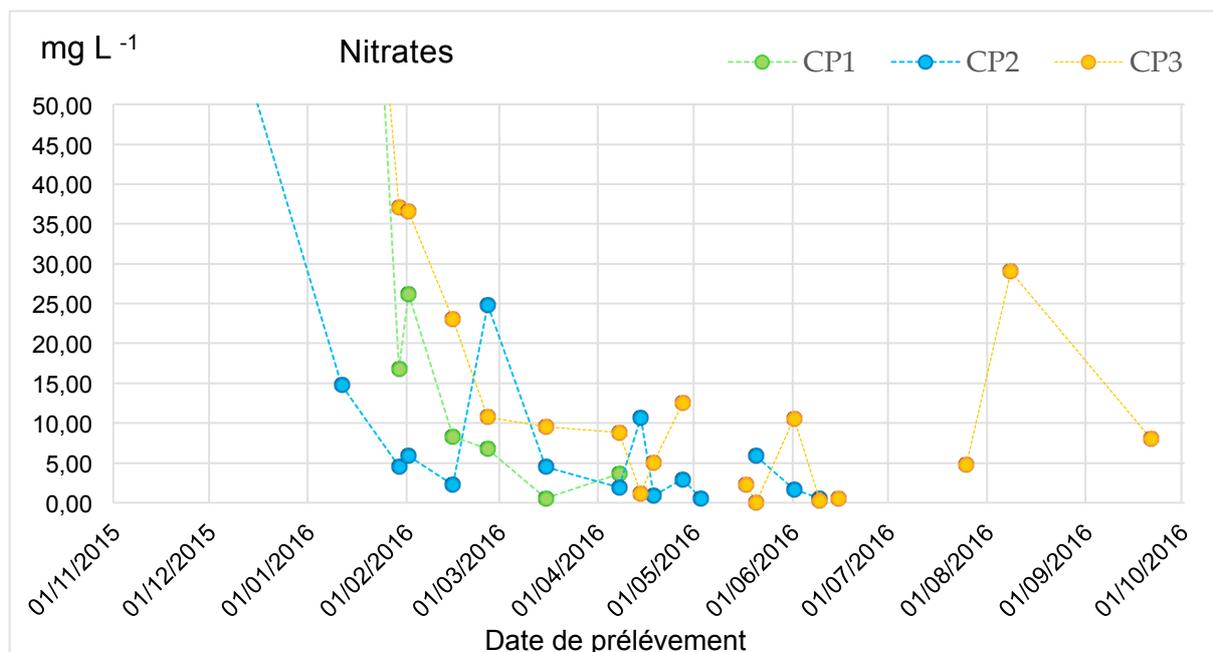


Figure 21. Détail des données représentées dans la Figure 20 pour les concentrations inférieures à 50 mg L⁻¹ : concentrations en nitrate mesurées dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol profond pour la modalité culture, n = 3 réplicats CP1 à CP3

Prairie en sol superficiel

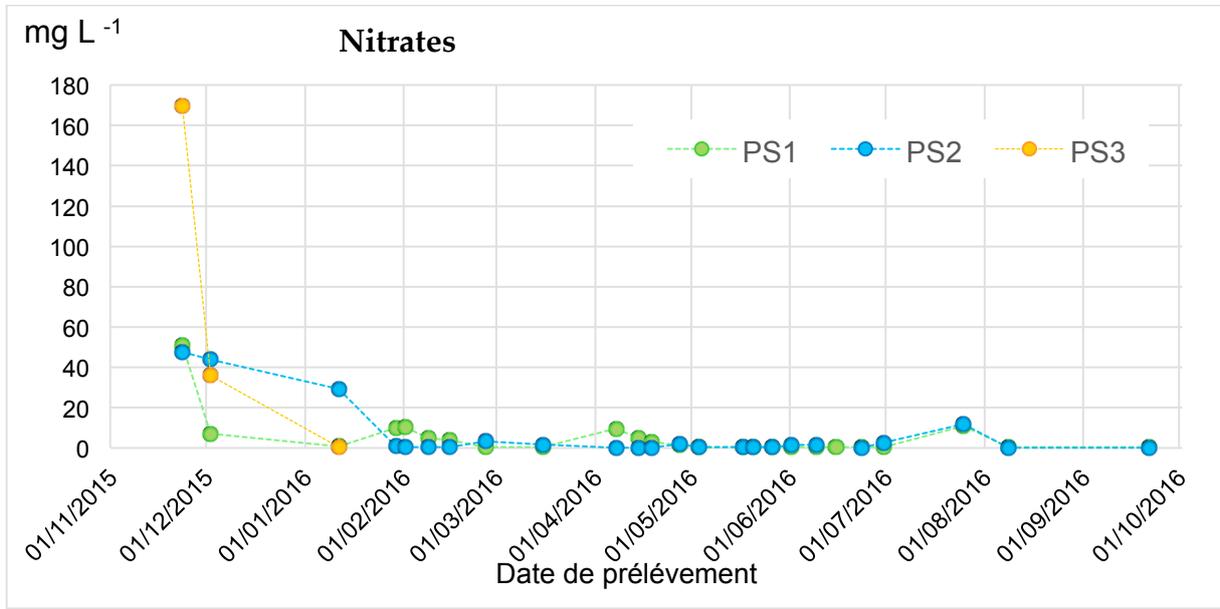


Figure 22. Concentrations en nitrate mesurées dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol superficiel pour la modalité prairie, n = 3 réplicats, PS1 à PS3

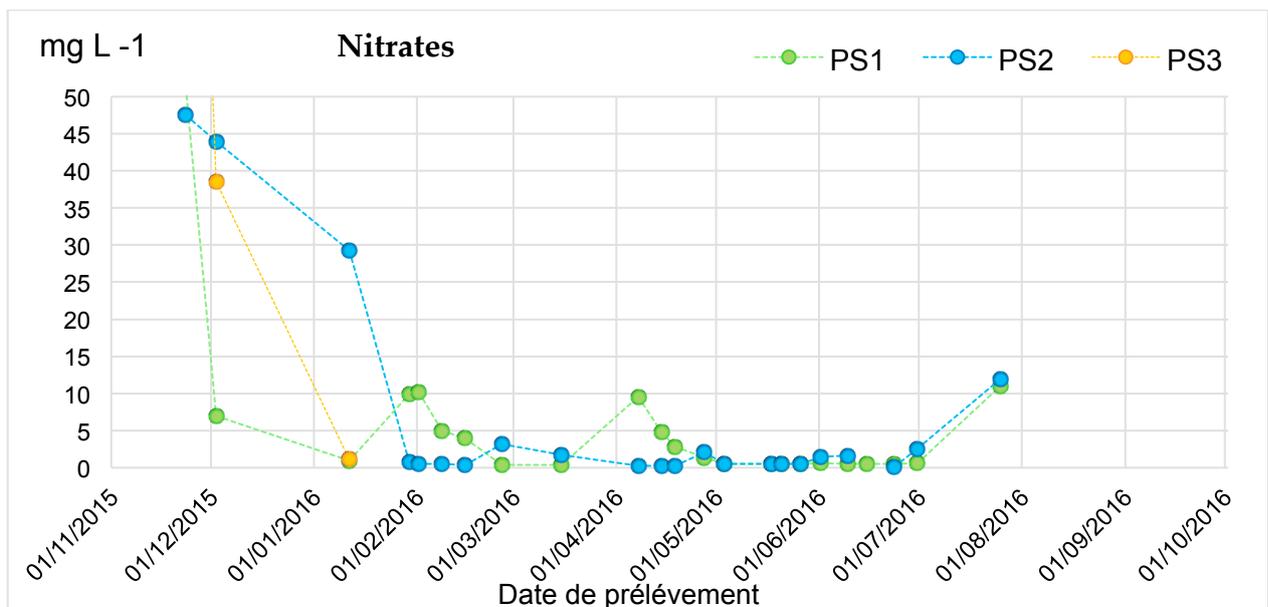


Figure 23. Détail des données représentées dans la Figure 22 pour les concentrations inférieures à 50 mg L⁻¹ : concentrations en nitrate mesurées dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol superficiel pour la modalité prairie, n = 3 réplicats, PS1 à PS3

Prairie en sol profond

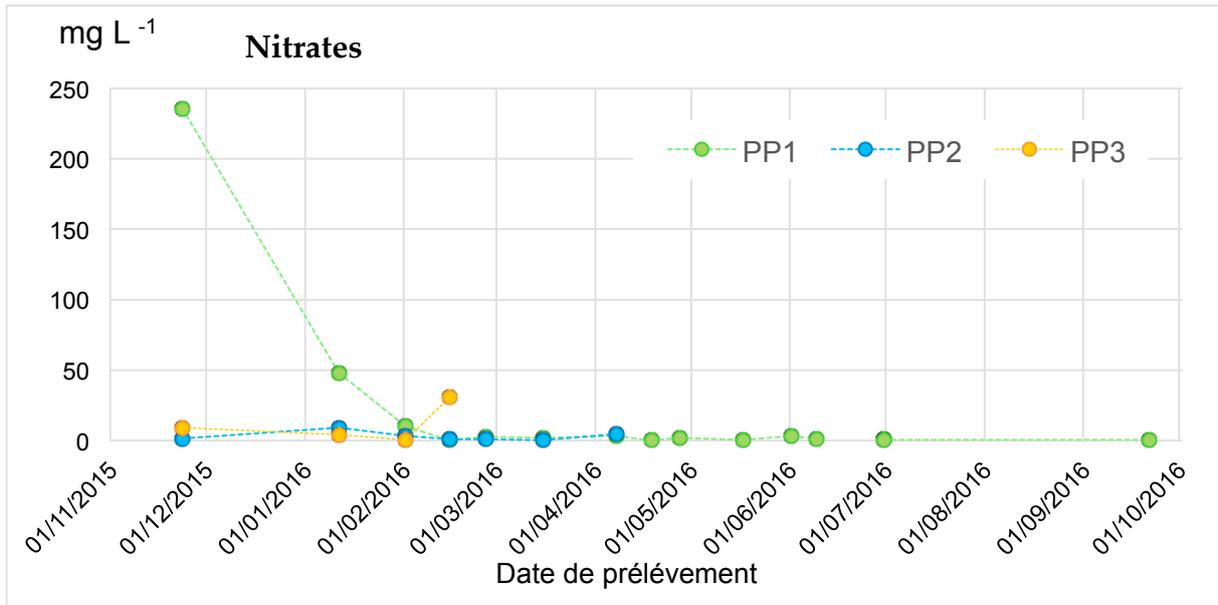


Figure 24. Concentrations en nitrate mesurées dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol profond pour la modalité prairie, n = 3 réplicats, PP1 à PP3

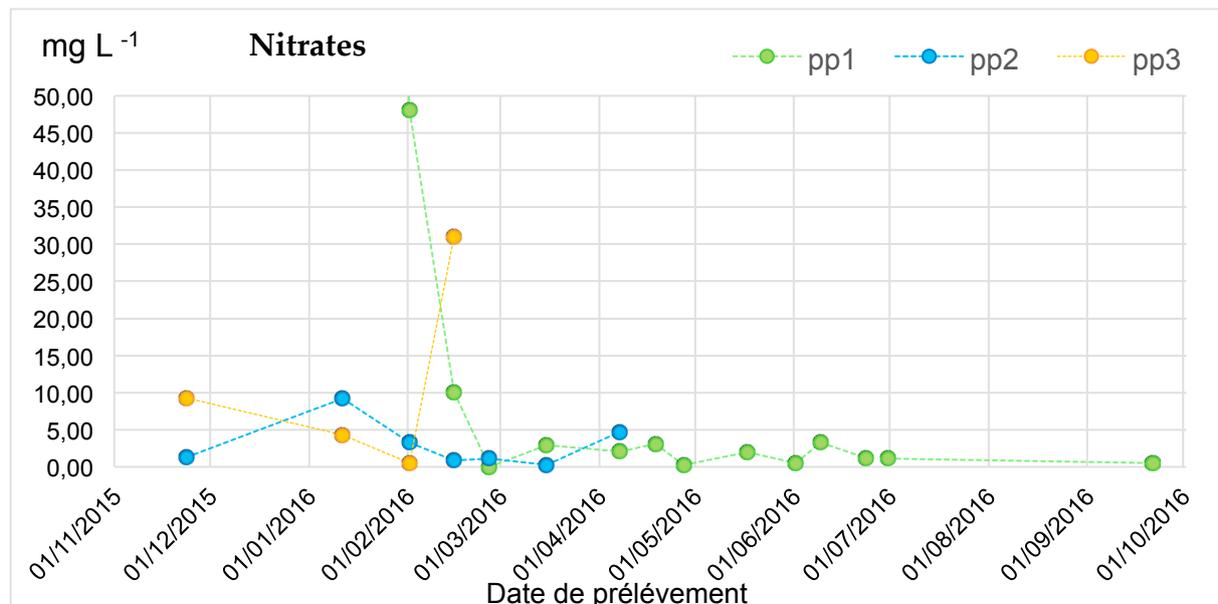


Figure 25. Détail des données représentées dans la Figure 24 pour les concentrations inférieures à 50 mg L⁻¹ : concentrations en nitrate mesurées dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol profond pour la modalité prairie, n = 3 réplicats PP1 à PP3

Conclusion provisoire : ce qui semble se dessiner

- Il existe une bonne concordance entre les différents réplicats, ce qui tend à montrer la validité du fonctionnement global du dispositif.
- Des niveaux élevés sont mesurés en hiver dans toutes les modalités (sans que l'on puisse évaluer aujourd'hui la part qui relève du fonctionnement normal du sol et celle consécutive à l'installation du dispositif) ; les concentrations en nitrates s'abaissent ensuite et restent globalement stables pendant la saison de végétation sauf événement spécifique (épandage, fertilisation...).
- Toutes choses étant égales par ailleurs, les concentrations en nitrates mesurées sous sol profond sont plus faibles que celles trouvées sous sol superficiel.
- De manière similaire, les concentrations mesurées sous prairie sont plus faibles que celles trouvées sous culture.

S'ils se confirment ces résultats sont en parfaite cohérence avec ce qui est attendu :

- Les sols superficiels sont par nature moins aptes à retenir les formes réactives solubles de l'azote (dont les nitrates) que les sols profonds.
- Les cultures, de par le travail du sol et les fertilisations plus importantes qu'elles supposent, sont plus susceptibles de transférer ces formes solubles de l'azote réactif vers le karst et les milieux aquatiques.

Il est très prématuré de formuler des recommandations de gestion. Cependant, les résultats actuels s'ils se confirment indiquent que la mise en valeur des sols superficiels, notamment lorsqu'ils font l'objet de cultures autre que la prairie, doit être conduite avec un soin particulier pour éviter les départs d'azote vers le karst.

Ammonium, culture en sol superficiel

A titre d'exemple, la Figure 26 fournit les variations de teneur en ammonium dans les eaux lysimétriques recueillies sous sol superficiel cultivé.

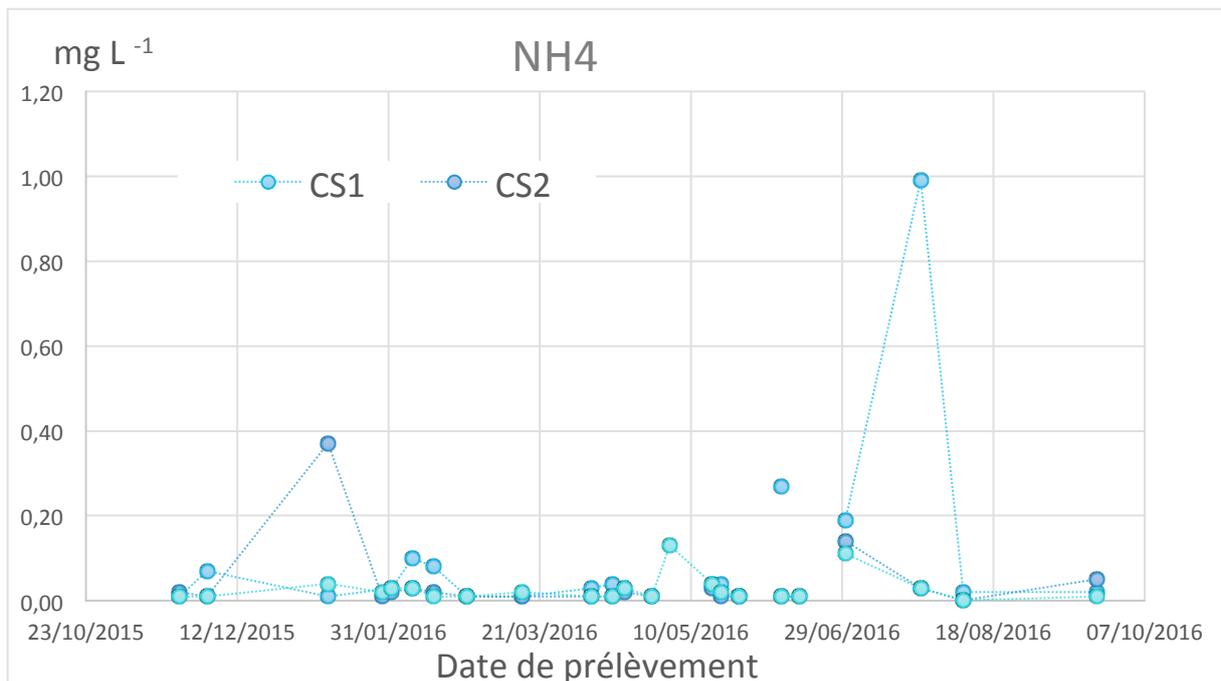


Figure 26. Concentrations en ammonium mesurées dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol superficiel pour la modalité culture, n = 3 réplicats, CS1 à CS3.

Les concentrations en ammonium mesurées dans les eaux des lysimètres toutes modalités confondues sont une fois sur trois inférieures aux limites de détection (0,01 mg L⁻¹).

Les concentrations mesurées restent faibles et sont toujours inférieures à 1 mg L⁻¹ avec une grande majorité de valeurs inférieures à 0,1 mg L⁻¹.

L'azote ammoniacal (sous forme NH₄⁺ principalement) provient de la décomposition par des bactéries de l'azote organique ou des rejets directs d'animaux (urines, excréments...). Lorsque le pH s'élève, les ions ammonium se transforment en ammoniaque toxique pour les organismes aquatiques. La concentration limite pour une eau potable se situe à 0,1 mg L⁻¹.

L'ammonium dans l'eau traduit habituellement un processus de dégradation incomplet de la matière organique. C'est donc un indicateur de la pollution de l'eau par des rejets organiques d'origine agricole, domestique ou industriel.

Nitrites : culture en sol superficiel

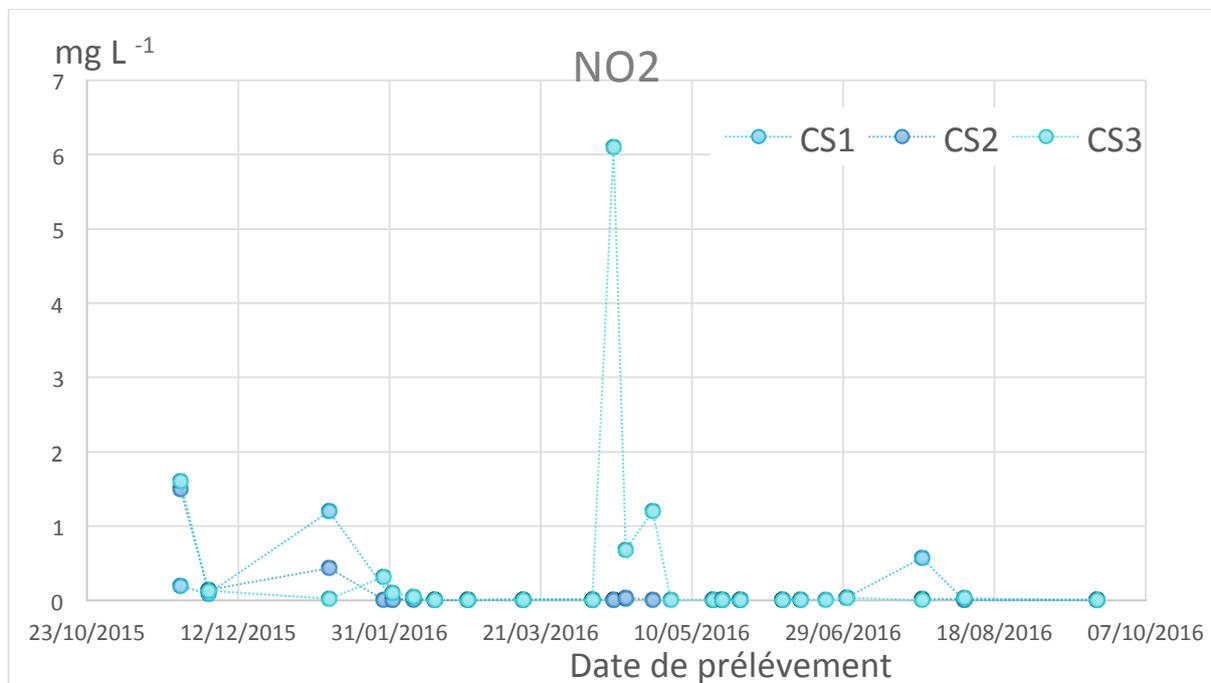


Figure 26. Concentrations en nitrites mesurées dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol superficiel pour la modalité culture, n = 3 réplicats, CS1 à CS3.

Par apport aux nitrates, les nitrites représentent une forme moins oxydée et moins stable de l'azote. Ce sont des produits intermédiaires de la nitrification de l'ammonium. Instables ils peuvent être toxiques pour le milieu aquatique. Dans les eaux exemptes de pollution, il n'y a pas (ou très peu) de nitrites. Leur toxicité est significative dans le milieu aquatique à partir de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$. Près de deux cents analyses de nitrites toutes modalités confondues ont été effectuées, 40 % de ces analyses présentaient des concentrations inférieures aux limites de détection.

Pour les concentrations supérieures aux seuils de détection, environ 50 % sont inférieures aux seuils de toxicité de $0,2 \text{ mg L}^{-1}$. Le reste des concentrations (60 analyses environ) dépassent ce seuil avec 8 concentrations supérieures au mg L^{-1} dont un pic à $6,1 \text{ mg L}^{-1}$ (Figure 26) le 14 avril 2016 en sol superficiel de la parcelle cultivée).

Phosphore total : culture en sol superficiel

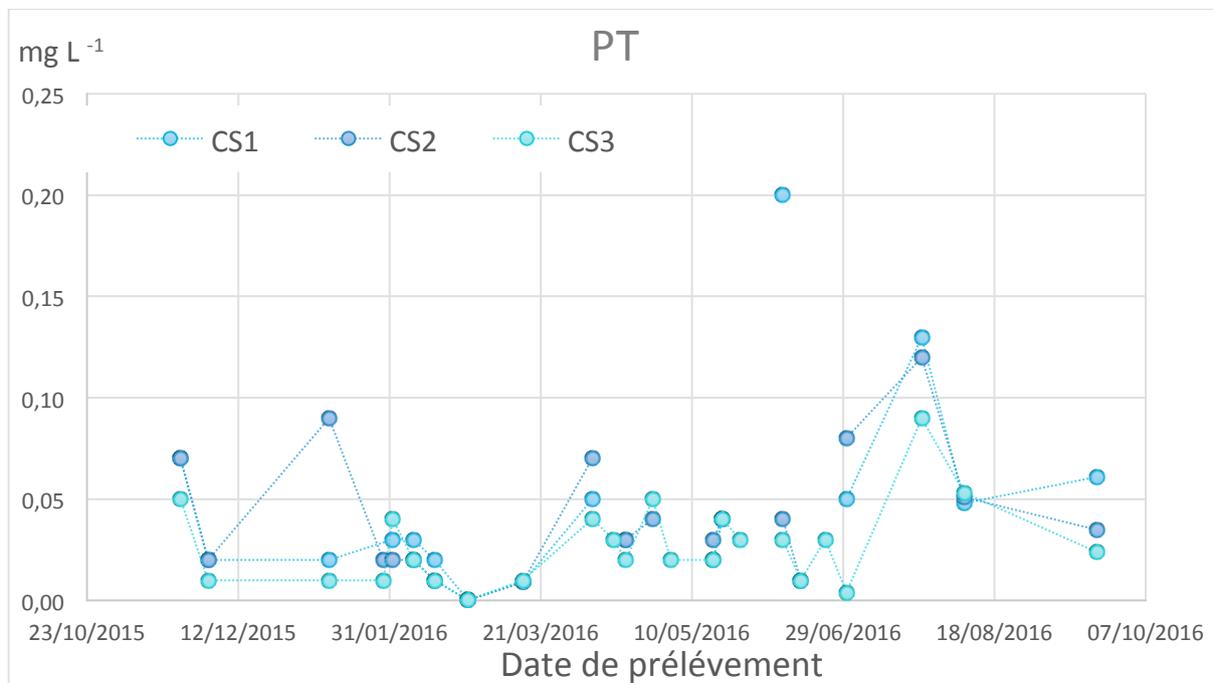


Figure 27. Concentrations en phosphore total mesurées dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol superficiel pour la modalité culture, n = 3 réplicats, CS1 à CS3.

Dans les eaux de surface comme dans les eaux usées, le phosphore se retrouve sous la forme de phosphates (dissous) et sous forme particulaire. Le phosphore présent dans les eaux de surface provient principalement des effluents municipaux, du lessivage et du ruissellement des terres agricoles fertilisées et des effluents de certaines industries. Le phosphore est un élément nutritif essentiel à la croissance des plantes.

Le phosphore total est systématiquement détecté dans les analyses des eaux issues des lysimètres : moins de 1 % des concentrations mesurées sont inférieures aux seuils de détection.

Les teneurs en phosphore total (toutes modalités confondues) restent toutefois faibles (exemple : Figure 27) avec seulement 40 analyses sur les 187 effectués supérieures à 0,1 mg L⁻¹ sans jamais dépasser 1 mg L⁻¹. Les concentrations en phosphore total restent donc faibles et ne traduisent pas à première vue un apport excessif.

Conductivité : culture en sol superficiel

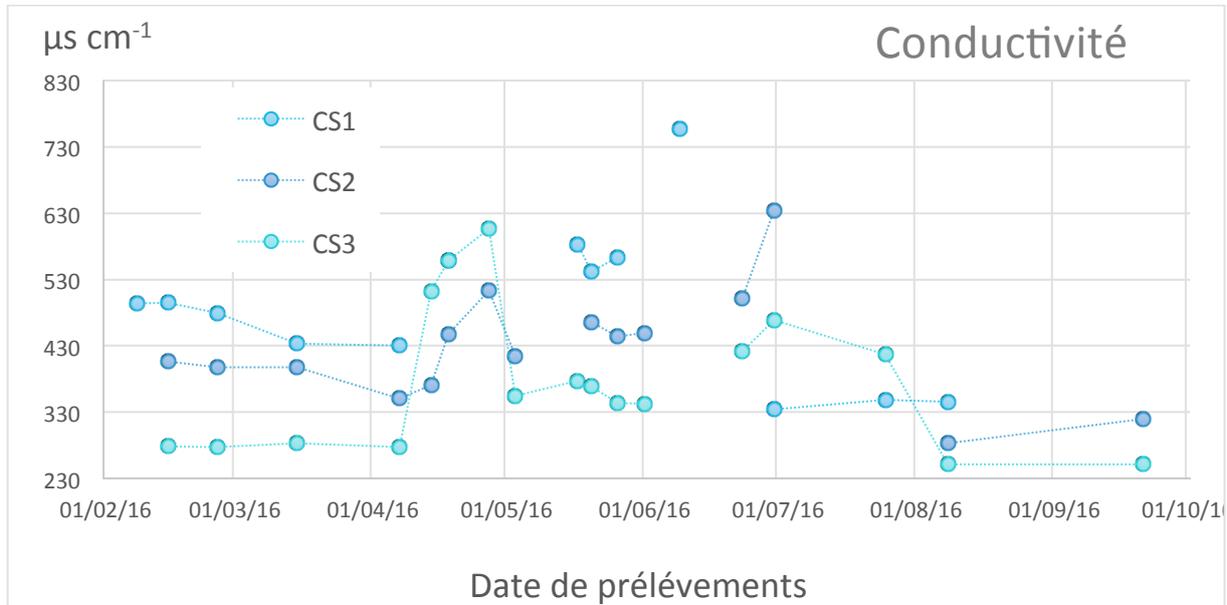


Figure 28. Variations de la conductivité en $\mu\text{S cm}^{-1}$ mesurée dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol superficiel pour la modalité culture, n = 3 réplicats, CS1 à CS3.

Culture en sol profond

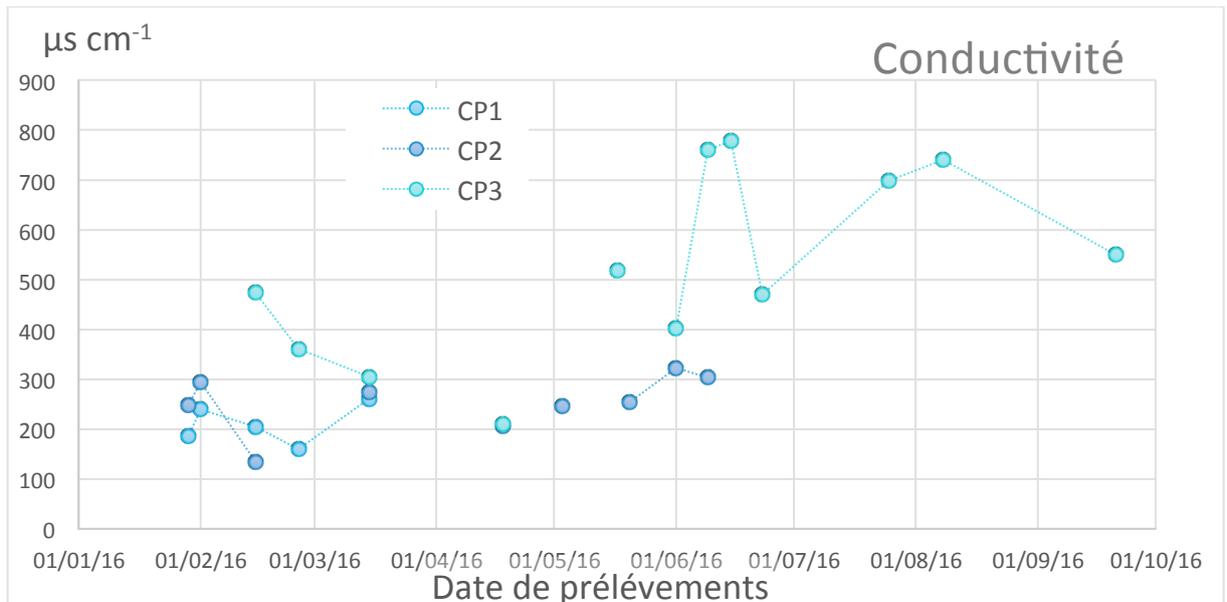


Figure 29. Variations de la conductivité en $\mu\text{S cm}^{-1}$ mesurée dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol profond pour la modalité culture, n = 3 réplicats, CP1 à CP3.

Conductivité : prairie en sol superficiel

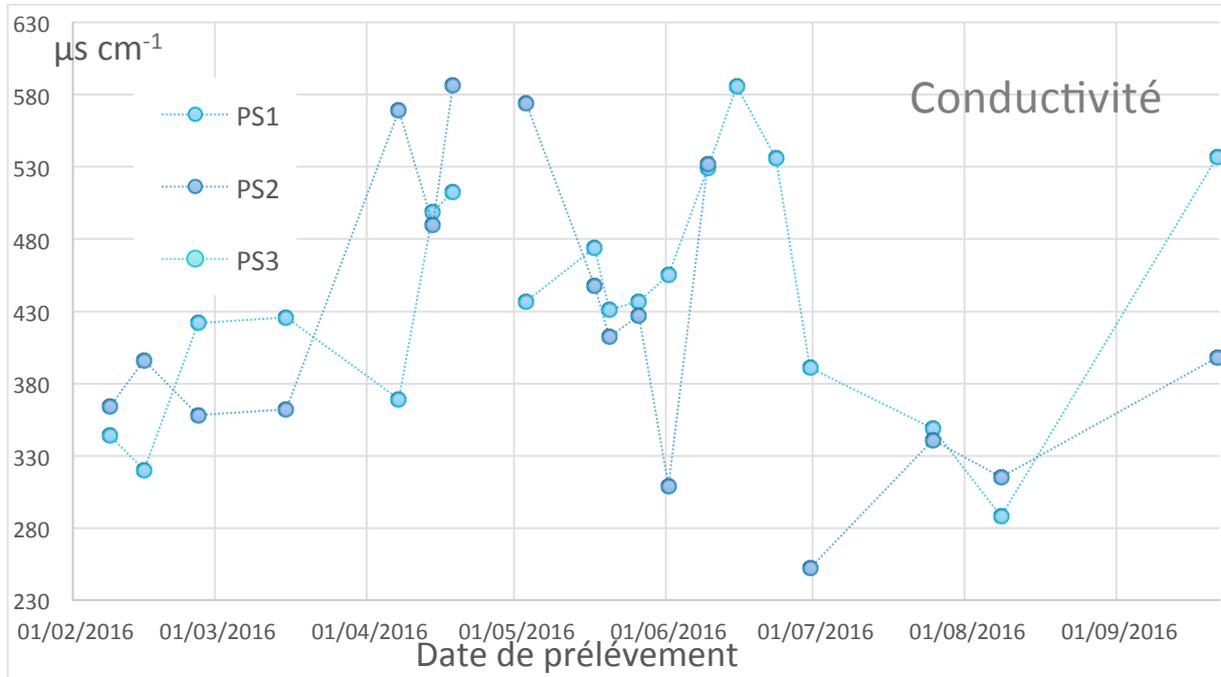


Figure 30. Variations de la conductivité en $\mu\text{S cm}^{-1}$ mesurée dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol superficiel pour la modalité prairie, n = 3 réplicats, PS1 à PS3.

Conductivité : prairie en sol profond

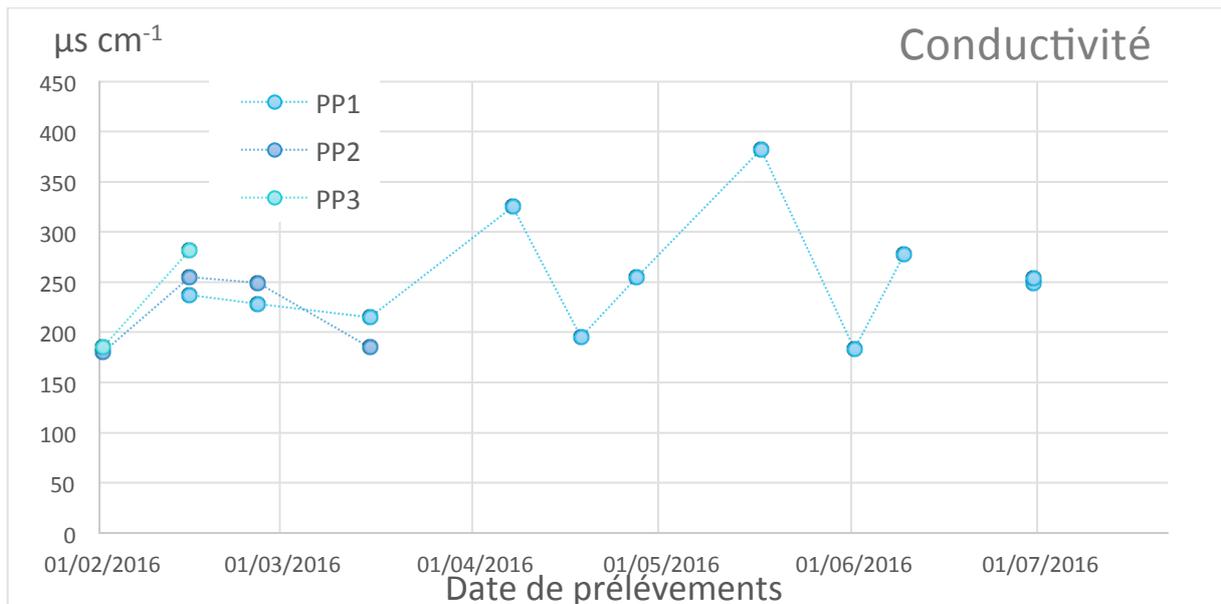


Figure 31. Variations de la conductivité en $\mu\text{S cm}^{-1}$ mesurée dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol profond pour la modalité prairie, n = 3 réplicats, PP1 à PP3.

La conductivité traduit la capacité d'une eau à conduire l'électricité. Elle est fonction de la concentration ionique et de la température de l'eau. Elle donne une bonne indication des changements de la composition des eaux, et spécialement de leur concentration en minéraux. La conductivité augmente avec la teneur en ions dissous. Cette mesure permet d'évaluer rapidement le degré de minéralisation d'une eau, c'est-à-dire la quantité de substances dissoutes ionisées présentes.

Les eaux récupérées des parcelles sous cultures (Figures 28 et 29) et sous prairies (Figures 30 et 31) présentent des valeurs de conductivité comprises entre 300 et 600 $\mu\text{S cm}^{-2}$. Les valeurs sous culture sont plus fortes que sous prairies. Ces valeurs sont à rapprocher de celles que nous avons observées dans la Loue précédemment (Mudry *et al.*, 2014)⁴.

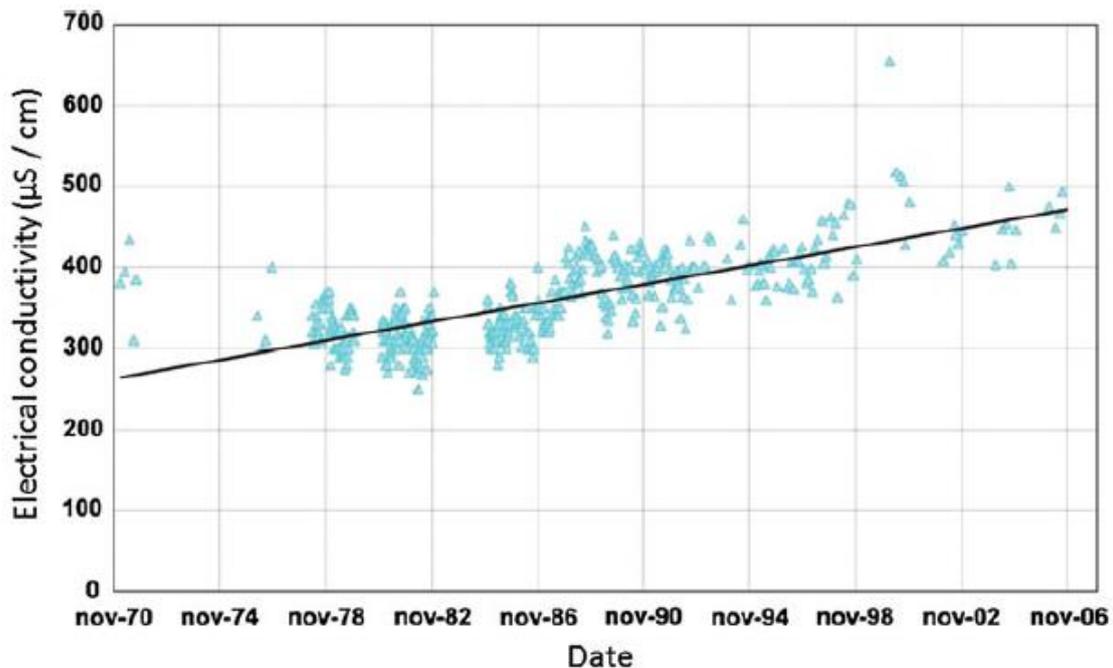


Figure 32. (Mudry *et al.*, 2014). Evolution de la conductivité électrique de la Loue à Chenecey-Buillon de 1970 à 2006

L'accroissement important de la conductivité des eaux sur plusieurs décennies a lieu dans un environnement karstique avec une occupation humaine et une activité économique modérées. Ceci ne peut être expliquée par l'augmentation des ions minéraux et de la charge en nutriments.

⁴ (2015) J. Mudry, F. Degiorgi, E. Lucot, E., P.M. Badot. Middle term evolution of water chemistry in a karst river : Example from the Loue River (Jura Mountains, Eastern France). In : Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems - Environmental Earth Sciences, Publisher : Springer, Editors : B. Andreo, F. Carrasco, J.J. Duran, P. Jimenez, J.W. LaMoreaux, pp.147-151. DOI : 10.1007/978-3_642-17435-3

Notre hypothèse est que les équilibres calco-carboniques ont été modifiés et que c'est le sol lui même qui subit de fortes pertes en carbone organique. Cette mobilisation de la matière organique des sols pourrait être la conséquence des changements de pratique agricole et ne serait que peu influencée par l'augmentation des teneurs en CO₂ atmosphérique sous l'effet du changement global⁵.

Les premiers résultats obtenus en terme de conductivité des eaux lysimétriques sont cohérents avec l'élévation de la conductivité des eaux des rivières karstiques observée précédemment. Une analyse plus approfondie doit être conduite pour étayer l'hypothèse explicative proposée.

Carbone organique total : culture en sol superficiel

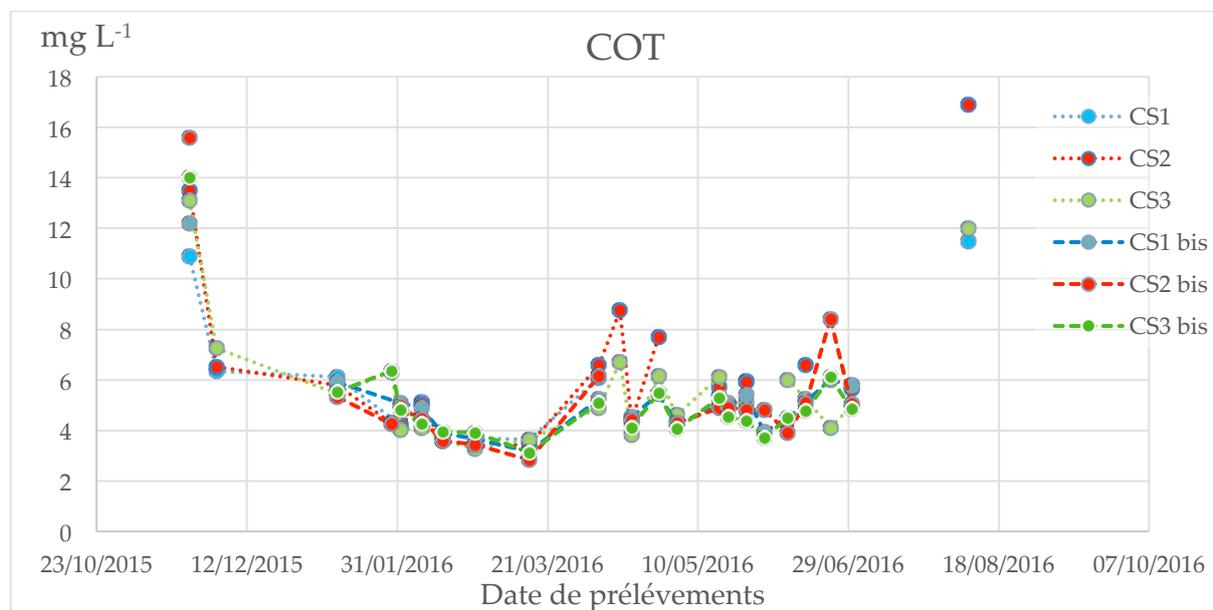
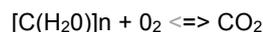


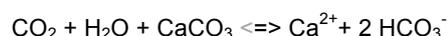
Figure 33. Variations de la concentration en carbone organique total mesurée dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol superficiel pour la modalité culture, n = 3 réplicats, CS1 à CS3, CS = analyses QUALIO, CSbis = analyses LCE

⁵ Schématiquement, le processus peut être schématisé comme suit

Des modifications de pratique agricole (intensification, labours, sols à nus...) favorisent la minéralisation (oxydation) de la matière organique [C(H₂O)]_n du sol. L'équilibre entre photosynthèse et respiration du sol est modifié dans le sens de la production de dioxyde de carbone.



L'excès de CO₂ conduit à une modification de l'équilibre calco-carbonique dans le sens de la dissolution du calcaire avec formation de bicarbonates.



Les bicarbonates dissous augmentent la conductivité électrique des eaux.

N.B. : il n'est pas nécessaire que le sol soit calcaire, l'équilibre calco-carbonique peut être modifié au sein même du karst

N.B.2 : en milieu aquatique, le fonctionnement photosynthétique des végétaux (consommation du CO₂) peut induire un déplacement de l'équilibre en sens opposé et provoquer ainsi la précipitation du carbonate de calcium favorisant la formation de tufs et d'encroutements calcaires.

Carbone organique total : culture en sol profond

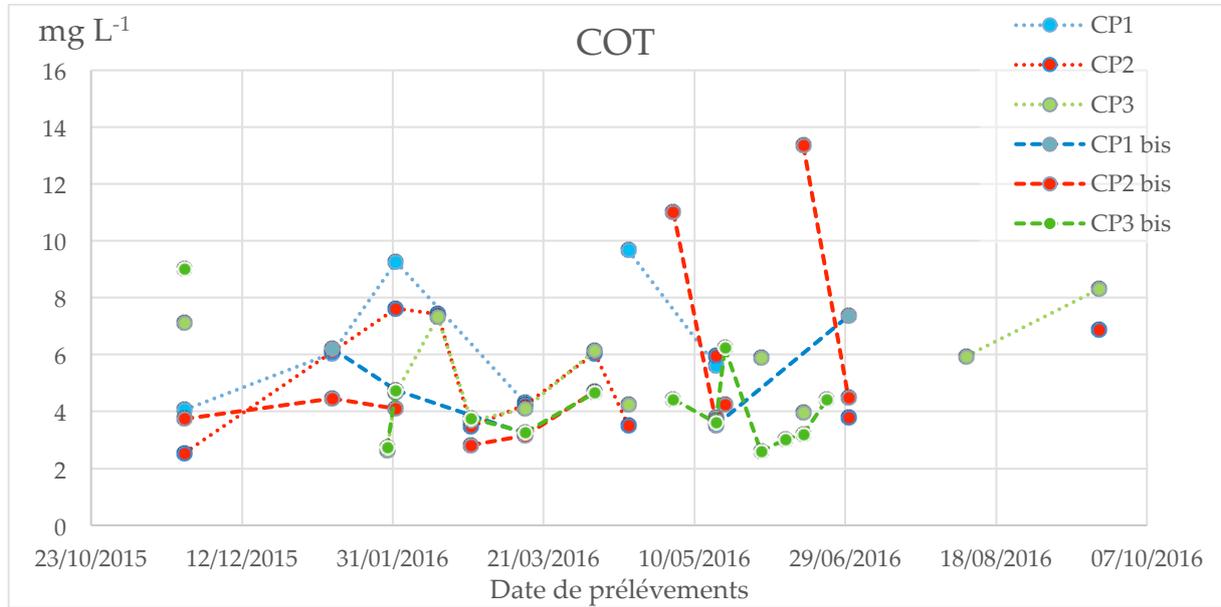


Figure 34. Variations de la concentration en carbone organique total mesurée dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol profond pour la modalité culture, n = 3 réplicats, CP1 à CP3, CP = analyses QUALIO, CPbis = analyses LCE

Carbone organique total : prairie en sol superficiel

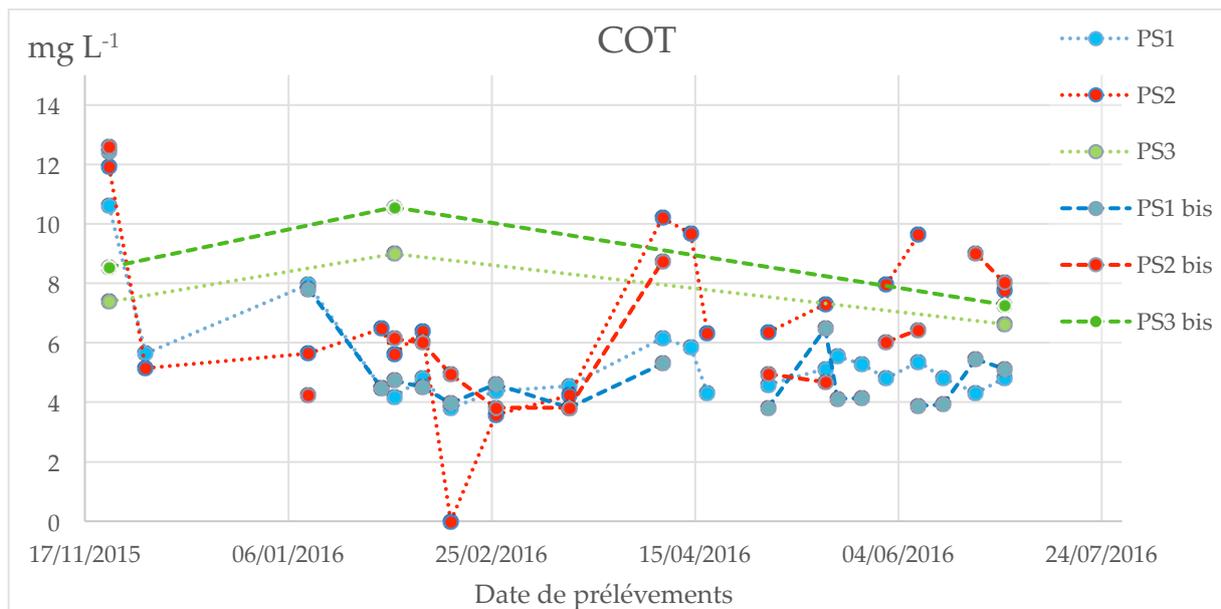


Figure 35. Variations de la concentration en carbone organique total mesurée dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol superficiel pour la modalité prairie, n = 3 réplicats, PS1 à PS3, PS = analyses QUALIO, PSbis = analyses LCE

Carbone organique total : prairie en sol profond

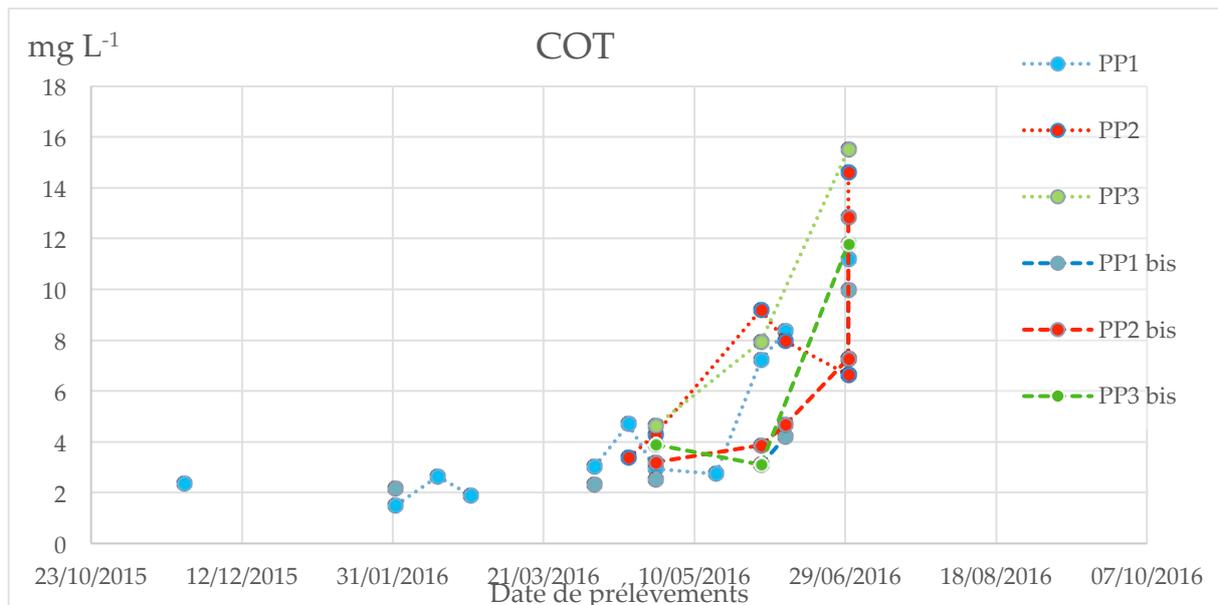


Figure 36. Variations de la concentration en carbone organique total mesurée dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol profond pour la modalité prairie, n = 3 réplicats, PP1 à PP3, PP = analyses QUALIO, PPbis = analyses LCE

Le carbone organique total (COT) correspond à l'ensemble du carbone organique présent dans une eau (forme particulaire + dissoute).

Dans les eaux de surface, la matière organique apportée du bassin versant est dite d'origine allochtone. Il s'agit de la matière organique issue de la dégradation des végétaux supérieurs transférée par les eaux de nappe et les eaux de ruissellement. Elle comprend également les apports de matière organique anthropique provenant des déjections animales (fumier, lisier), des résidus urbains et/ou industriels (boues de station d'épuration, hydrocarbures...) ou encore de l'utilisation de produits phytosanitaires. Les matières organiques constituent le plus souvent un ensemble complexe de molécules regroupées en trois classes de composés : les composés simples ou non humiques, les composés humiques et les polluants organiques.

Le COT mesuré dans les eaux issues des lysimètres est présenté dans les Figures 33 à 36. La grande majorité des valeurs est comprise entre 2 et 6 mg L⁻¹ ce qui correspond à des eaux faiblement chargées en matière organique. Quelques pics sont observés ponctuellement dépassant les 10 mg L⁻¹ traduisant transitoirement des transferts non négligeables en carbone organique vers le milieu souterrain.

Bicarbonates : culture en sol superficiel

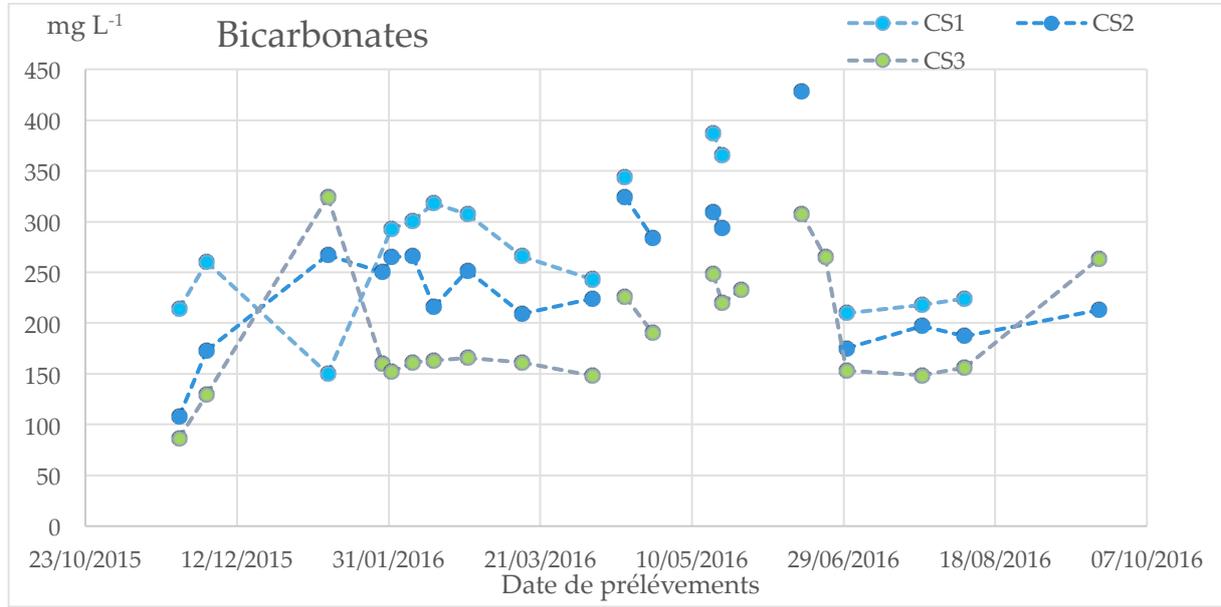


Figure 37. Variations de la concentration en bicarbonates mesurée dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol superficiel pour la modalité culture, n = 3 réplicats, CS1 à CS3

Bicarbonates : culture en sol profond

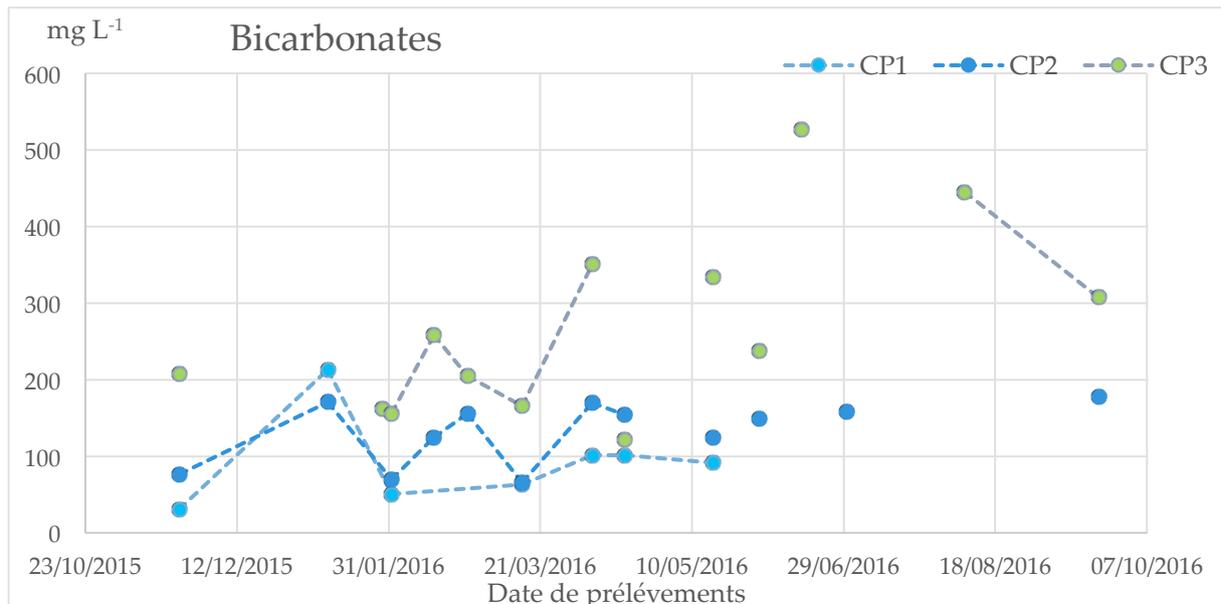


Figure 3. Variations de la concentration en bicarbonates mesurée dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol profond pour la modalité culture, n = 3 réplicats, CP1 à CP3

Bicarbonates : prairie en sol superficiel

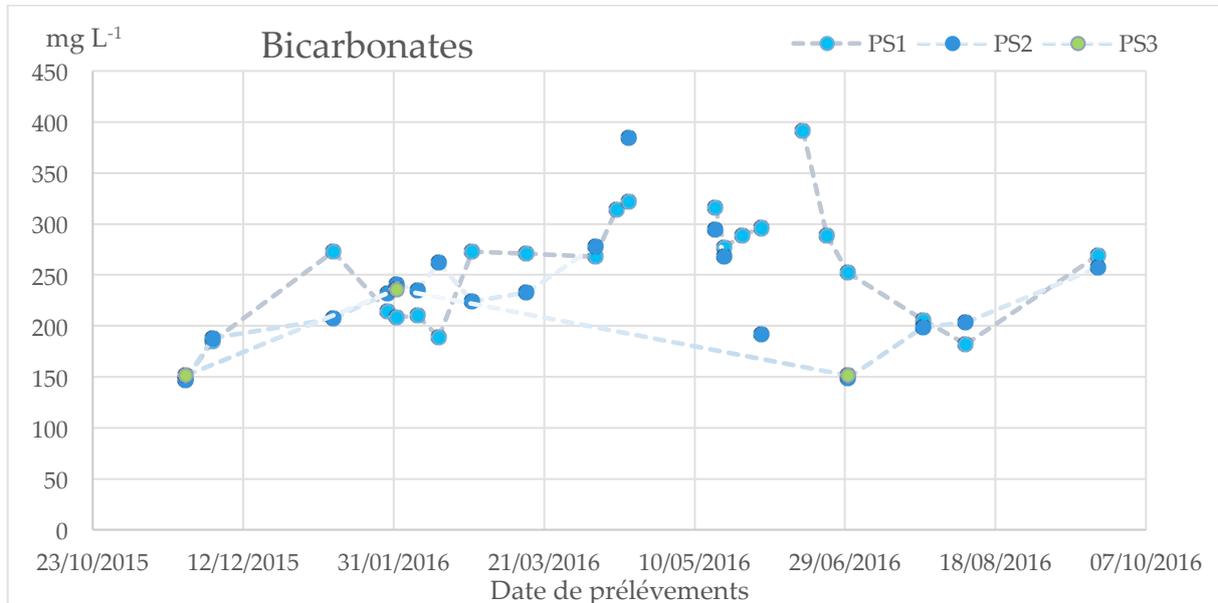


Figure 39. Variations de la concentration en bicarbonates mesurée dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol superficiel pour la modalité prairie, n = 3 réplicats, PS1 à PS3

Bicarbonates : prairie en sol profond

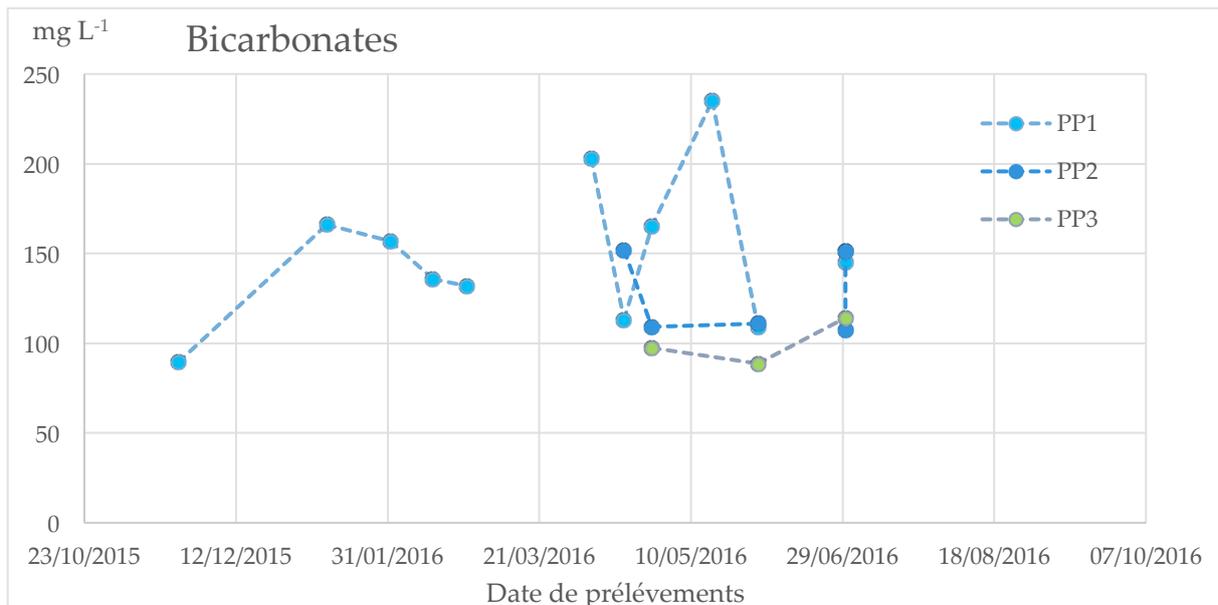


Figure 40. Variations de la concentration en bicarbonates mesurée dans l'eau des plaques lysimétriques installées à Chasnans (Grand Bief) en sol profond pour la modalité prairie, n = 3 réplicats, PP1 à PP3

Les Figures 37 à 40 présentent les variations des teneurs en bicarbonates des eaux lysimétriques au cours de l'année de prélèvement (novembre 2015 à octobre 2016) dans les 4 modalités étudiées.

En sol superficiel sous culture, les teneurs en bicarbonate sont le plus souvent comprises entre 150 et 350 mg L⁻¹, avec des pics (avril-mai-juin) correspondant à la période de croissance de la végétation et avoisinant 450 mg L⁻¹.

En sol profond sous culture, les teneurs en bicarbonate varient entre quelques mg L⁻¹ et 250 mg L⁻¹, avec quelques valeurs plus élevées entre 300 et 500 mg L⁻¹ observées sur un des réplicats pendant la saison de végétation.

En sol superficiel sous prairie, les concentrations en bicarbonate oscillent entre 150 et 350 mg L⁻¹, avec des valeurs légèrement supérieures d'avril à juin (extremums à 400 mg L⁻¹).

En sol profond sous prairie, les concentrations en bicarbonate n'excèdent jamais 250 mg L⁻¹, et les valeurs mesurées sont le plus souvent de l'ordre de 100 à 150 mg L⁻¹.

Ces résultats indiquent donc que les sols superficiels produisent des eaux lysimétriques plus riches en bicarbonate que les sols profonds. Ils montrent aussi que la mise en valeur prairiale ou culturale des sols n'induit pas le plus souvent de différences sensibles en ce qui concerne les niveaux de base en bicarbonate dans les eaux lysimétriques. Il semble cependant que les eaux lysimétriques recueillies sous culture présentent des extremums plus élevés que leurs homologues sous prairie.

Une nouvelle fois, ces résultats - s'ils se confirment - sont en pleine cohérence avec l'hypothèse avancée précédemment. Les sols superficiels produisent des eaux lysimétriques dont les teneurs en bicarbonate et la conductivité électrique sont plus élevées que celles mesurées en sol profond. Ceci témoigne aussi d'un déplacement de l'équilibre calco-carbonique dans les sols dans le sens d'une dissolution du carbonate de calcium.

Conclusions provisoires

Le fonctionnement des sols agricoles du bassin versant a été appréhendé par une approche lysimétrique distinguant 4 modalités définies en croisant les deux critères que sont la profondeur du sol (profond/superficiel) et sa mise en valeur (culture/prairie).

A ce jour, ce sont 24 plaques lysimétriques (2 sites, 4 modalités par site, 3 réplicats par modalités) qui ont été installées dans les bassins versants du Grand Bief (installation été 2015, premiers résultats novembre 2015) et de Plaisir Fontaine (installation été 2016, premiers résultats automne 2016).

Les premiers résultats obtenus concernant les nitrates, même s'ils sont encore indicatifs, peuvent être résumés comme suit :

- Il existe une bonne concordance entre les différents réplicats, ce qui tend à montrer la validité du fonctionnement global du dispositif.
- Des niveaux élevés sont mesurés en hiver dans toutes les modalités (sans que l'on puisse évaluer aujourd'hui la part qui relève du fonctionnement normal du sol et celle consécutive à l'installation du dispositif) ; les concentrations en nitrates s'abaissent ensuite et restent globalement stables pendant la saison de végétation sauf événement spécifique (épandage, fertilisation...).
- Toutes choses étant égales par ailleurs, les concentrations en nitrates mesurées dans les eaux lysimétriques recueillies sous sol profond sont plus faibles que celles trouvées sous sol superficiel.
- De manière similaire, les concentrations mesurées sous prairie sont plus faibles que celles trouvées sous culture.

S'ils se confirment ces résultats sont en parfaite cohérence avec ce qui est attendu :

- Les sols superficiels sont par nature moins aptes à retenir les formes réactives solubles de l'azote (dont les nitrates) que les sols profonds.
- Les cultures, de par le travail du sol et les fertilisations plus importantes qu'elles supposent, sont plus susceptibles de transférer ces formes solubles de l'azote réactif vers le karst et les milieux aquatiques.

Il est très prématuré de formuler des recommandations de gestion. Cependant, les résultats actuels s'ils se confirment indiquent que la mise en valeur des sols superficiels, notamment lorsqu'ils font l'objet de cultures autre que la prairie, doit être conduite avec un soin particulier pour éviter les départs d'azote vers le karst.

En ce qui concerne les autres formes réactives de l'azote (nitrites, ammonium),

il est prématuré de tirer des conclusions définitives, mais sauf pics ponctuels il ne semble pas que ces substances soient susceptibles d'être transférées de manière significative des sols vers le karst et le cours d'eau.

Concernant le phosphore total, les premières données à notre disposition n'indiquent pas de risque notable d'exportation de cet élément vers le karst et le cours d'eau, confirmant ainsi les conclusions que nous avons précédemment formulées lors des diverses études conduites au cours des tranches antérieures à savoir que les teneurs en phosphore dans l'eau ne sont pas de nature à expliquer les dysfonctionnements de la rivière.

Les premiers résultats obtenus en matière de conductivité électrique et de concentrations en bicarbonates dans les eaux lysimétriques forment un tout cohérent.

- La conductivité des eaux lysimétriques est élevée et les niveaux atteints sont du même ordre que ceux mesurés dans la rivière, niveaux qui sont en constante augmentation depuis plusieurs décennies.
- La conductivité est essentiellement liée aux concentrations en bicarbonate.
- Ces résultats confirment l'hypothèse d'une modification de l'équilibre calco-carbonique que nous avons émise précédemment.

Toute augmentation de la minéralisation de la matière organique des sols — qui pourrait elle-même être consécutive à l'intensification des pratiques agricoles — modifie l'équilibre calco-carbonique et provoque la libération de dioxyde de carbone, qui favorise la dissolution du carbonate de calcium.

S'il s'avère que ces processus sont d'ampleur significative à l'échelle du bassin versant de la Loue (premiers résultats à valider/compléter dans la tranche 3), ils peuvent rendre compte de certains dysfonctionnements constatés dans la rivière : la conjonction d'un apport accru de nutriments et de bicarbonates crée des conditions favorables à la prolifération des végétaux aquatiques. Les apports de nutriments azotés qui sont normalement limitant favorisent la croissance des végétaux, dont l'activité photosynthétique consomme le dioxyde de carbone, ce qui in fine favorise la précipitation des carbonates (cf. encroutements calcaires)

Parallèlement, les résultats obtenus en matière de contaminants chimiques (insecticides, HAP...) montrent que les populations d'invertébrés aquatiques sont exposés à certains micropolluants à des niveaux provoquant des effets toxiques, ce qui contribue aux réductions de biodiversité enregistrées depuis plusieurs décennies (cf. rapports précédents).

L'origine multifactorielle des dysfonctionnements de la rivière que nous avons proposée dès 2010 (cf. réunions des comités d'experts locaux) et qui constitue notre hypothèse de travail se trouve ainsi conforter.

Les investigations en cours en matière de fonctionnement du bassin versant et en matière d'effets des contaminants chimiques doivent être poursuivies de manière à être en mesure d'évaluer la part respective des différents facteurs de causalité dans les dysfonctionnements constatés dans la rivière : perte de biodiversité, mortalités...

Cette priorisation des causes est un préalable à la définition des mesures de gestion ad hoc qui permettront de restaurer le bon état écologique de la rivière tout en préservant les équilibres sociaux et économiques liés à la mise en valeur agricole, touristique, urbaine et industrielle du territoire.

Annexe – Occupation des sols dans les bassins versants du Grand Bief (Lods) et de Plaisir Fontaine

