

Quasagro - Gestion agronomique des sols et des résidus : quels impacts sur la qualité sanitaire des productions végétales de grande culture ?

**Donnat E.¹, Vivien E.², Crouzet O.³, Budzinski H.⁴, Dévier M-H.⁴, Pinson-Gadais L.⁵,
Taupier-Létage B.⁶, Dauguet S.⁷, Méléard B.⁸, Thunot S.², Denaix L.²**

¹ ACTA, 149 rue de Bercy, F-75595 Paris Cedex 12

² INRAE UMR 1391 ISPA, Centre de Bordeaux Aquitaine, 71 avenue E. Bourlaux, CS 20032, F-33882 Villenave d'Ornon

³ INRAE UMR 1402 EcoSys, Route de la Ferme, F-78850 Thiverval-Grignon

⁴ Université de Bordeaux/CNRS UMR 5805 EPOC – OASU, 351 Cours de la Libération, F-33405 Talence Cedex

⁵ INRAE UR 1264 MycSA, Centre de Bordeaux Aquitaine, 71 avenue E. Bourlaux, CS 20032, F-33882 Villenave d'Ornon

⁶ ITAB, 525 route de Gothon, F-26320 Saint Marcel les Valence

⁷ Terres Inovia, Parc Industriel, 11 Rue Gaspard Monge, F-33600 Pessac

⁸ ARVALIS – Institut du végétal, station expérimentale, F-91720 Boigneville

Correspondance : emilie.donnat@acta.asso.fr

Résumé

En relation avec la qualité sanitaire des produits de la récolte, le projet Quasagro visait à valider des éléments de gestion globale des risques multicontaminants (mycotoxines, éléments-traces métalliques et résidus de pesticides) associés aux facteurs environnementaux et aux pratiques agronomiques en grandes cultures (blé tendre, blé dur et tournesol) par analyse multifactorielle : effets pédoclimatiques, résidus de culture, intrants et apports de matière organique. Il s'est appuyé sur le réseau national de parcelles Quasaprove, renforcé par des essais plein champ existants.

Par une approche sans a priori, des modèles statistiques ont été testés sur le blé tendre, à partir de paramètres pédologiques ou climatiques. Aucun modèle ne s'est révélé suffisamment prédictif. Nous avons également cherché si certaines pratiques entraînaient des différences de concentration dans les végétaux. Il est apparu qu'il n'y a pas de différence entre les parcelles labourées et non labourées, en fonction du type de fertilisation, ou en fonction du précédent ou de l'usage d'un CIPAN. Aucune différence n'est apparue non plus entre les parcelles conduites en agriculture biologique ou en agriculture conventionnelle. Quelle que soit la culture, l'équilibre est déterminé par le type de fertilisation. Dans le cas de la fertilisation uniquement azotée (ammonitrate), le bilan est toujours négatif. Dans le cas de la fertilisation organique en agriculture biologique, le bilan est toujours positif et le sol accumule les éléments-traces. Dans le cas de l'agriculture conventionnelle avec fertilisation NPK, le bilan est positif pour l'arsenic, le cadmium et le plomb, et négatif pour le cuivre et le zinc. L'exportation des pailles, qui génère un flux d'exportation relativement faible, ne change pas ces conclusions.

Sur les parcelles étudiées, les niveaux de concentration cumulés observés s'échelonnent du sub-ng/g à la centaine de ng/g (ps) dans les sols. Les concentrations cumulées maximales en agriculture biologique sont de l'ordre de la dizaine de ng/g. Par comparaison des itinéraires techniques conventionnel/biologique, les herbicides sont présents de façon marquée en conventionnel et quasi

absents en biologique ; les fongicides sont présents en biologique à des concentrations supérieures aux limites de quantification et les niveaux de fongicides sont relativement similaires en biologique et en conventionnel dit raisonné. La présence notable de pesticides rémanents (e.g. époxiconazole dont les derniers traitements dataient de plusieurs années) a également été mise en évidence.

Le devenir des pesticides dans l'environnement est conditionné par leur comportement dans les sols. L'interaction entre divers processus régissant leur devenir (rétention, dégradation, transfert) va conditionner entre autres leur persistance (ou rémanence). Plus particulièrement, les processus de dégradation des pesticides contribuent à diminuer cette persistance. Le potentiel de biodégradation microbienne dépend ainsi des molécules (toxicité intrinsèque, capacité d'adsorption au sol), de facteurs pédoclimatiques (type d'argiles, matière organique, température et humidité), de facteurs microbiens tels que la biomasse globale et la présence de micro-organismes adaptés à certaines molécules (ex: isoproturon, 2,4-D) et des historiques de traitement (fréquence de traitement).

D'une manière générale, il semble que les systèmes bas intrants favorisent l'activité microbienne des sols, par rapport aux systèmes conventionnels.

Mots-clés : Contaminants, résidus, éléments-traces, mycotoxines, pesticides, sols, blé, tournesol, pratiques culturales, intrants, pédoclimat, flux, dégradation

Abstract: Quasagro - Agronomic management of soils and residues: what are the impacts on the sanitary quality of crop production?

In relation to the sanitary quality of the harvest products, the Quasagro project aimed at validating elements of global management of multicontaminant risks (mycotoxins, metallic trace elements and pesticide residues) associated with environmental factors and agronomic practices in field crops (soft wheat, durum wheat and sunflower) by multifactorial analysis: soil and climate conditions effects, crop residues, inputs and addition of organic matter. It relied on the national Quasaprove plot network, reinforced by existing field experiment.

By an approach without *a priori*, statistical models were tested on soft wheat, based on soil or climatic parameters. No model proved to be sufficiently predictive. We also examined whether certain practices led to differences in concentration in plants. It was found that there was no difference between plowed and unplowed plots, depending on the type of fertilization, the preceding crop or the use of a CIPAN. There was no difference between plots in organic agriculture or in conventional agriculture. Whatever the crop, the balance was determined by the type of fertilization. In the case of nitrogen-only fertilization (ammonitrate), the balance was always negative. In the case of organic fertilization in organic farming, the balance was always positive and the soil accumulated trace elements. In the case of conventional agriculture with NPK fertilization, the balance was positive for arsenic, cadmium and lead, and negative for copper and zinc. The export of straws, which generated a relatively small export flow, did not change these conclusions.

On the studied plots, the cumulative concentration levels observed ranged from sub-ng/g to 100 ng/g (dw) in soils. The maximum cumulated concentrations in organic farming were close to 10 ng/g. By comparison of conventional / biological technical itinerary, herbicides were markedly present in conventional and almost absent in biological; fungicides were present in biological at concentrations above the limits of quantification and the levels of fungicides were relatively similar in biological and in conventional called reasoned. The significant presence of persistent pesticides (epoxiconazole, which last treatment were several years ago) has also been highlighted.

The future of pesticides in the environment is conditioned by their behavior in soils. The interaction between various processes governing their future (retention, degradation, transfer) will determine, among others, their persistence (or remanence). In particular, pesticide degradation processes help to

reduce this persistence. The potential of microbial biodegradation depends on the molecules (intrinsic toxicity, soil adsorption capacity), soil and climate factors (type of clays, organic matter, temperature and humidity), microbial factors such as global biomass and the presence of microorganisms adapted to certain molecules (isoproturon, 2,4-D) and historical treatments (frequency of treatment).

In general, low input systems seem to favor soil microbial activity in comparison conventional systems.

Keywords: Contaminants, residues, trace elements, mycotoxins, pesticides, soils, wheat, sunflowers, cultural practices, inputs, soil and climate conditions, flow, degradation

Introduction

Contexte

L'Etude de l'Alimentation Totale 2 (EAT2) de l'Anses, a rendu public le 1^{er} juillet 2011 les résultats obtenus sur l'exposition des consommateurs aux contaminants présents sous forme de résidus dans l'alimentation. Cette étude a pointé notamment des risques de dépassement des seuils toxicologiques pour le plomb, le cadmium, l'arsenic inorganique, ainsi que pour une famille de mycotoxines (Déoxynivalenol ou DON et ses dérivés). Les contributeurs majoritaires sont par exemple, le pain pour le cadmium, le plomb, le DON et ses dérivés. A travers cette étude, l'Anses insiste sur la nécessité de poursuivre les actions de gestion des risques dans le sens de la réglementation et auprès des filières afin de réduire les teneurs de ces contaminants dans les aliments principalement contributeurs. Les productions végétales issues de grandes cultures, à la base de notre alimentation, sont fortement concernées.

Pour les productions françaises de blé dur, l'effet pédoclimat expliquerait plus de 75 % de la variabilité des teneurs en cadmium (Barrier-Guillot et al., 2012). La seule teneur totale en métal dans les sols reste insuffisante pour prédire la concentration accumulée dans les plantes (Baize et Tomassonne, 2003 ; Grant et al., 1998). En effet, pour qu'un élément-trace soit absorbé par un végétal (donc être biodisponible), il doit être libéré de la matrice solide du sol et passer en solution. Des paramètres tels que le pH ou les matières organiques jouent un rôle primordial : l'acidification des sols accroît la mobilité et biodisponibilité des métaux alors qu'une augmentation de la teneur en matières organiques va les limiter (McLaughlin et Singh, 1999 ; Sauvé et al., 1998, 2000 ; Stephan et al., 2008). Ainsi, l'épandage de produits organiques, particulièrement utilisés en agriculture biologique, conduisant à augmenter la teneur en matière organique des sols et potentiellement les teneurs en éléments-traces, pourra jouer sur la dynamique des flux d'éléments-traces dans les systèmes de culture. L'effet du précédent cultural a également été mis en évidence, mais la raison n'est pas clairement identifiée : s'agit-il d'un effet sur le pH, sur les propriétés du sol, sur le flux revenant au sol (Grant et al., 2010) ? Le relargage d'éléments-traces adsorbés par les matières organiques particulières, au cours de leur dégradation (voie microbienne) dans les sols, demeure un processus très débattu. Ainsi, il semble nécessaire de mieux caractériser la biodisponibilité des éléments traces dans différents sols et pour différents modes de gestion des intrants.

La gestion des résidus de culture ainsi que la nature du précédent cultural ont été identifiées comme principaux facteurs de risque DON (Gourdain et al., 2009 ; Obst and Bechtel, 2000 ; Schaafsma et al., 2001). La présence dans le sol de résidus de la récolte précédente est décrite dans la littérature comme déterminante, les *Fusarium* étant capables de survie saprophyte. Cette aptitude est particulièrement marquée dans le cas de *F. graminearum* (Landschoot et al., 2011 ; Naef et Defago, 2006), principal agent producteur de DON. Si la relation entre résidus (gestion, type de résidu) et niveau de contamination en DON des récoltes a été soulevée, peu d'études ont cherché à comprendre l'origine de cette relation. Cette compréhension s'avère cependant indispensable pour pouvoir exploiter et intégrer

de façon optimale ce facteur dans la définition de stratégies de contrôle du risque DON. De manière identique et plus générale, si plusieurs études ont montré comment le mode de culture (gestion des résidus mais aussi traitements fongicides, rotation, date de semis, choix variétal, etc.) pouvait impacter les teneurs en DON, ces études sont souvent restées très descriptives et n'ont pas cherché à comprendre comment l'équilibre de la flore fongique présente sur les épis pouvait être impacté et entraîner une modulation de la production de mycotoxines par les espèces toxigènes. En s'intéressant à quantifier les principales espèces fongiques sur grains et sur résidus, en intégrant la variable climatique et ainsi une association différente d'espèces, ce projet permettra de recueillir des données très originales sur les relations mode de culture / équilibre d'espèces / mycotoxinogénèse.

Les apports d'amendements organiques et le recyclage des résidus de récolte peuvent impacter le devenir des pesticides dans les sols, aussi bien en modulant l'activité des microorganismes dégradants que la rétention des molécules et donc leur transfert vers les milieux aquatiques connexes. Les résultats sont parfois contrastés et dépendraient à la fois de la quantité et de la qualité des matières organiques apportées (Perrin Garnier et al., 2001), mais également des voies de biodégradation des pesticides considérés (co-métabolisme ou métabolisme direct). La conversion de parcelles conventionnelles, ayant subi durant de nombreuses années des traitements phytosanitaires, peut poser un problème de rémanence des contaminants organiques qui reste sous-évalué et méconnu.

Très peu de données existent dans la bibliographie sur la rémanence et l'évolution des capacités de biodégradation microbienne de pesticides dans des parcelles après conversion en agriculture biologique (Fernandes et al., 2012). L'EAT2 n'a pas mis en évidence de contaminations importantes des aliments par les pesticides. Les pesticides détectés étaient essentiellement utilisés lors du stockage des récoltes et non résultant d'une contamination avant récolte. Les plans de surveillances des instituts techniques ne mettent pas non plus en évidence de contaminations détectables. Nous avons par conséquent choisi de nous focaliser majoritairement sur la contamination des sols dans ce projet, donnant l'occasion unique de faire un état des lieux et de comparer ainsi la qualité des sols et des intrants organiques en agriculture conventionnelle et biologique.

La problématique de la contamination des récoltes par les éléments traces métalliques ou les mycotoxines, de la persistance des résidus de pesticides dans les sols, parfois de nombreuses années après leur utilisation, se pose quels que soient le mode de conduite et le type d'agriculture. La place croissante de l'agriculture biologique nécessite d'intégrer ce mode de culture dans une problématique générale. En outre, il est apparu essentiel de gérer les contaminations de manière conjointe afin d'éviter que des solutions pertinentes pour un type de contaminant conduisent à des effets négatifs pour un autre. Ainsi, l'un des enjeux forts du projet a été de pouvoir répondre aux inquiétudes des filières grandes cultures et des agriculteurs face à la réglementation européenne de plus en plus exigeante (mycotoxines et éléments traces métalliques) et face à la réduction de l'usage des produits phytosanitaires (plan Ecophyto) ou à des cahiers des charges spécifiques. Actuellement, les teneurs de certains métaux (cadmium et plomb) et mycotoxines dont le DON sont réglementées en Europe (EC 1881/2006 et EC 56/2005). En effet, suivant les années, plus de 10 % de la production annuelle de blé dur ont présenté une concentration en DON supérieure à la valeur limite. Pour le cadmium, entre 14 et 85 % de la production de blé dur présentait des concentrations supérieures 0,1 mg/kg, possible limite de la prochaine réglementation européenne. Des teneurs élevées peuvent aussi être rencontrées dans les tourteaux de tournesol puisque plus de 15 % de la production française suivie dans le cadre du Plan de Surveillance des Oléagineux présente une concentration entre 0,8 et 1 mg/kg, cette valeur étant la valeur limite pour l'alimentation animale (Dauguet et Lacoste, 2013). Une meilleure gestion de la contamination des céréales et oléagineux est donc indispensable pour garantir leur commercialisation.

Le projet CasDAR Multicontamination a permis en particulier de soulever l'hypothèse de mécanismes de contamination des productions végétales par les éléments-traces métalliques et les mycotoxines non totalement indépendants (Donnat et al., 2016). Mais, les processus expliquant la contamination sont complexes (Figure 1) et le manque de références techniques et scientifiques, de données explicatives

et d'indicateurs prédictifs aboutis rend difficile un bon accompagnement des professionnels dans la gestion des contaminations de leurs cultures.

Pour tous ces contaminants (organiques, minéraux ou toxines biologiques), il est important de disposer de bases de données regroupant des indicateurs ainsi que les contextes pédoclimatiques et agronomiques afin de pouvoir proposer des valeurs de référence et mieux comprendre les mécanismes de la contamination pour trouver des leviers de contrôle. La gestion agronomique des sols et des résidus a été la voie d'étude innovante retenue dans ce projet.

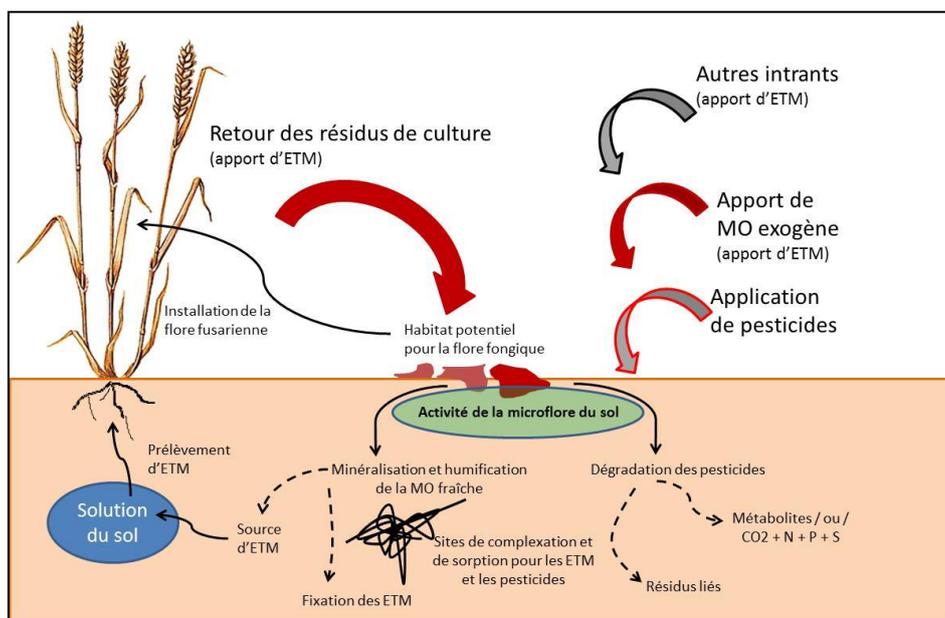


Figure 1 : Impact et devenir des contaminants dans les sols agricoles de grandes cultures

Objectifs généraux du projet

L'objectif du projet Quasagro était d'affiner la compréhension des niveaux de contamination élevés en mycotoxines, éléments traces métalliques et résidus de pesticides des sols agricoles et/ou des productions végétales de grande culture en plein champ, en fonction des pratiques culturales et des facteurs environnementaux :

- En analysant l'effet des propriétés pédoclimatiques et des historiques de traitements phytosanitaires sur le potentiel de dégradation des pesticides et sur la biodisponibilité des éléments traces métalliques dans les sols : *effet du pédoclimat* ;
- En caractérisant les résidus de culture vis-à-vis de leur potentiel infectieux sur la fusariose des épis, de leur concentration en résidus de pesticides et de leur effet sur la biodisponibilité des éléments traces pour une meilleure gestion du risque en amont : *effet résidus de culture* ;
- En intégrant le calcul du flux d'éléments traces métalliques à la parcelle (entrant/sortant/de transformation) pour évaluer l'impact sur leur biodisponibilité : *effet intrants* ;
- En étudiant l'effet des apports de matières organiques sur la biodisponibilité des éléments-traces métalliques, la persistance de résidus de pesticides et le potentiel infectieux : *effet matière organique*.

Pour mieux comprendre les déterminismes agro-pédologiques des multicontaminations en grande culture, le projet a proposé une démarche qui associe une approche sans *a priori* à une approche expérimentale, utilisant d'une part des réseaux expérimentaux existants et d'autre part des expérimentations en conditions contrôlées.

Pour mener à bien ce projet, l'ACTA, ARVALIS-Institut du végétal, l'ITAB, Terres Inovia, les chambres régionales d'agriculture de Nouvelle-Aquitaine et des Pays de la Loire, l'INRA (cinq unités de recherche, une unité de service et sept unités expérimentales), l'Université de Bordeaux-EPOC/LPTC, l'EPLEFPA Bougainville de Brie-Comte-Robert et Bordeaux Sciences Agro se sont associés pour apporter leurs compétences et leur expertise et réaliser des expérimentations communes.

1. Niveaux de contamination des cultures et des sols agricoles par une approche sans *a priori*

1.1 Objectifs et démarches

L'approche sans *a priori* permet, en s'appuyant sur le réseau de parcelles du RMT Quasaprove, de recenser les niveaux de contamination du blé tendre, du blé dur et du tournesol (pour les mycotoxines et les éléments traces métalliques) et des sols agricoles (pour les résidus de pesticides et les éléments traces métalliques) cultivés en agriculture conventionnelle et biologique.

1.2 Description des caractéristiques générales du réseau de parcelles

Le projet Quasagro a permis de consolider un observatoire de la contamination des sols et des cultures, positionné sur les grandes cultures. Il se compose de parcelles distribuées sur le territoire français métropolitain issues de fermes expérimentales de lycées agricoles, d'exploitations gérées par des particuliers ou supportant des essais des instituts techniques (ARVALIS-Institut du Végétal, Terres Inovia, ITAB) et des parcelles d'unités INRA. Les cultures suivies au cours du projet ont été le blé tendre, le blé dur et le tournesol. Les contaminants suivis ont été les suivants :

- Pour les sols : les éléments-traces (arsenic (As), cadmium (Cd), césium (Cs), chrome (Cr), cobalt (Co), cuivre (Cu), molybdène (Mo), nickel (Ni), plomb (Pb), thallium (Tl), zinc (Zn), uranium (U)) et depuis 2016, les résidus de pesticides dans une approche multirésidus ;
- Pour les plantes : les éléments-traces (arsenic (As), bore (Bo), cadmium (Cd), césium (Cs), chrome (Cr), cobalt (Co), cuivre (Cu), nickel (Ni), plomb (Pb), zinc (Zn), uranium (U)), et les mycotoxines (Déoxynivalénol (DON) et Déoxinivalénol acétylé (15 A-DON et 3 ADON), Nivalénol (NIV) et Fusarénone (FX)) sur les grains de blé dur et blé tendre.

Les caractéristiques physicochimiques des sols (pH, CEC, MO, CaCO₃) et les éléments majeurs pour les sols et les plantes ont également été analysés. Les analyses ont été réalisées par le Laboratoire d'Analyses des Sols (LAS) d'Arras pour les sols, l'Unité de Service et de Recherche en Analyses Végétales et Environnementales (USRAVE) pour les éléments majeurs et traces dans les plantes et l'Unité de recherche Mycologie et Sécurité des Aliments (MycSA) pour les mycotoxines dans les plantes. Les analyses ont été complétées par une enquête annuelle sur les pratiques.

Sur ce réseau, nous disposions déjà d'un suivi de trois ans sur les éléments-traces et les mycotoxines, mais il était indispensable de compléter ce suivi afin de valider les premières observations et d'obtenir des valeurs de référence pour les niveaux de contamination rencontrés. L'approche multicontaminants a été élargie aux résidus de pesticides afin de mieux appréhender la problématique de la rémanence des résidus de pesticides dans les sols agricoles. Les résultats constituent un premier état des lieux de la multicontamination des sols et des végétaux cultivés.

Les flux entrants/sortants à la parcelle pour les éléments-traces métalliques ont été quantifiés afin de prédire des bilans à moyen terme tenant compte des pratiques propres à chaque système de culture.

Dans le détail, les sols ont été prélevés et analysés pour leurs teneurs en éléments traces et en résidus de pesticides. Sur les parcelles sélectionnées, de nombreux pesticides appartenant à différentes

classes [fongicides et insecticides (triazoles, pyréthrinoïdes, etc.) ou herbicides (urées, etc.)] ont été ainsi recherchés par différentes méthodes analytiques.

Les plantes ont été prélevées au stade récolte pour l'analyse des mycotoxines de *Fusarium* et les éléments traces. Un prélèvement au stade jeune a été aussi réalisé pour les éléments-traces car il a été montré, dans un projet précédent, que c'était un indicateur précoce de la qualité à la récolte pour le blé tendre et le tournesol.

Les intrants (fertilisants minéraux et/ou organiques) ont également été prélevés afin d'en analyser la teneur en éléments traces et de calculer les flux d'éléments-traces apportés à la parcelle.

Enfin, une enquête annuelle sur les pratiques et le déroulement de la culture a été réalisée.

Toutes ces données sont venues alimenter la base de données Quasaprove issue du projet CASDAR sur l'étude de la multicontamination des productions végétales de grande culture en conditions de plein champ.

Le réseau Quasaprove a permis de rassembler 143 parcelles sur 36 sites répartis sur la quasi-totalité du territoire métropolitain (Figure 2).

Les horizons de surface ont été prélevés sur une profondeur de 30 cm. La comparaison des sols du réseau avec les sols de grandes cultures métropolitains, collectés et analysés dans le cadre du Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS), a permis de vérifier que les sols analysés dans le cadre du réseau sont bien représentatifs des sols agricoles français, avec cependant un nombre un peu plus élevé de sols alcalins.

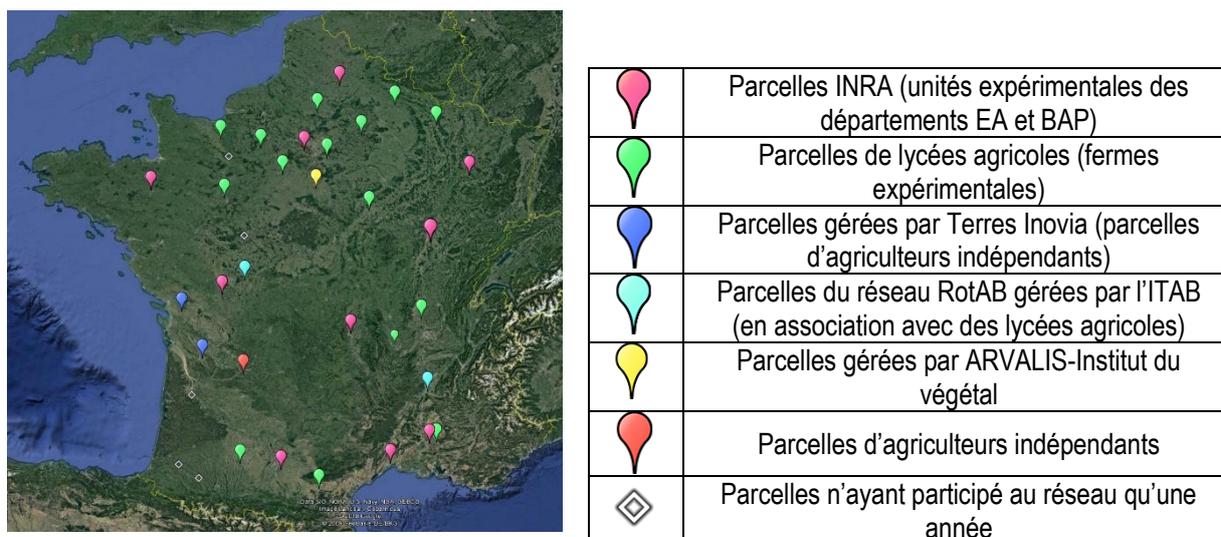


Figure 2 : Localisation des sites participant actuellement (ou ayant participé) au réseau Quasaprove

1.3 Niveaux de contamination observés

1.3.1 Sols

143 parcelles ont été échantillonnées et analysées. Il apparaît une forte variabilité selon les éléments, le rapport entre les concentrations les plus faibles rencontrées et les concentrations les plus fortes allant de 7 pour l'uranium jusqu'à 54 pour l'arsenic et 60 pour le molybdène.

Pour tous les éléments analysés, la médiane obtenue sur le réseau est légèrement supérieure à la médiane du RMQS, ce qui montre une contamination diffuse des sols agricoles. Trois éléments

présentent des concentrations maximales dépassant la réglementation nationale pour l'épandage de boues de STEP : le cuivre, le chrome et le plomb.

Sur la plupart des sites, la concentration en **arsenic** du sol est strictement corrélée à la concentration en fer. Cela laisse suggérer une origine géogène, le fer provenant essentiellement des roches constitutives des sols. Ainsi, les concentrations élevées observées sur le réseau s'expliquent essentiellement par des concentrations élevées en fer. Dans un cas, les parcelles analysées sont d'anciennes parcelles viticoles. Il est ainsi probable que l'arsenic provienne alors des traitements contre les maladies du bois (arsénite de soude ou de plomb), interdits depuis 2001.

Le **cadmium** est connu pour être présent dans les roches carbonatées et phosphatées, notamment les craies et calcaires jurassiques, avec des concentrations variables selon les dépôts sédimentaires. Il est également apporté dans les sols agricoles avec les engrais phosphatés et avec les boues et composts.

Dans les parcelles du réseau, les concentrations maximales sont effectivement observées sur les sols développés sur roche calcaire. L'hypothèse d'une origine géologique de cet élément semble réaliste. Il n'y a pas de relation entre la teneur en carbonate, en calcium ou en phosphore et la concentration en cadmium.

Les parcelles du réseau présentant des concentrations élevées en **cuivre**, au-delà des valeurs de la réglementation sur l'épandage des boues de station d'épuration, sont toutes d'anciennes parcelles viticoles ou arboricoles ayant reçu du cuivre utilisé comme fongicide pour lutter contre le mildiou.

Présent dans certaines roches naturellement magmatiques, dans l'atmosphère lié à l'utilisation du plomb dans les essences jusqu'en 2000, utilisé comme produit de traitement dans la vigne et les vergers jusqu'en 2001, retrouvé parfois en quantité importante dans les composts urbains, les boues de STEP et les fumiers, le **plomb** a été retrouvé en fortes concentrations dans des parcelles du réseau conduites autrefois en maraîchage. Cette contamination est vraisemblablement liée à des épandages anciens de composts urbains et a conduit à un dysfonctionnement de la minéralisation dans ce sol, avec un C/N élevé. Pour la plupart des parcelles, il apparaît une corrélation positive entre la teneur en plomb et la teneur en fer. Ainsi, certaines concentrations élevées en plomb dans les sols sont liées à de fortes concentrations en fer, et pourraient donc être d'origine géogène. Cependant, s'écartent de cette corrélation les parcelles périurbaines, les parcelles anciennement viticoles et les parcelles sur substrat calcaire jurassique.

Le **chrome** est présent en forte concentration dans les roches volcaniques et métamorphiques, ainsi que dans certaines roches sédimentaires, en particulier les roches phosphatées. Sur les parcelles du réseau, sa relation avec la concentration en fer laisse supposer une origine géologique. La dispersion de certains points autour de la droite pourrait s'expliquer par la fertilisation phosphatée. En effet, les teneurs en chrome dans les engrais phosphatés peuvent également être importantes.

1.3.2 Productions végétales

Sur l'ensemble du réseau, 130 échantillons (grain et paille) de **blé tendre** ont été analysés. Seuls deux échantillons de grains cultivés sur deux parcelles provenant de sites différents, dépassent les valeurs réglementaires en plomb.

27 échantillons (grain et paille) de **blé dur** ont été analysés sur le réseau. Les mêmes seuils réglementaires que pour le blé tendre s'appliquent pour le blé dur. Le blé dur est connu pour être une espèce accumulatrice de cadmium. Cela se confirme sur le réseau. Seuls trois échantillons de grains dépassent les valeurs réglementaires. Ces lots de blé dur ont été cultivés sur la même parcelle, trois années différentes. Par comparaison avec les différentes parcelles cultivées en blé dur, celle-ci a une teneur en cadmium non excessive (juste un peu plus élevée que la moyenne) mais présente un pH plus faible que les autres parcelles. Il est à noter que l'année où le pH du sol était le plus faible correspond aussi à l'année où la concentration dans le grain a été la plus élevée. Le paramètre pH, qui est connu

pour jouer fortement sur la biodisponibilité du cadmium, semble donc être un facteur explicatif des valeurs élevées de cadmium dans le grain de blé dur dans ce cas. Un chaulage de la parcelle, induisant une augmentation de pH, pourrait permettre de tester cette hypothèse et de proposer un mode de gestion simple de la contamination sur ce site.

Pour les mycotoxines, les valeurs mesurées ont été dans tous les cas inférieures à la réglementation pour l'alimentation humaine et animale.

35 parcelles en **tournesol** ont été suivies et analysées jusqu'à la récolte. Les valeurs sont conformes à la réglementation animale mais, pour le cadmium, nous avons enregistré des valeurs se rapprochant de cette limite.

1.4 Bilans en éléments-traces à moyen terme

La récolte des grains et/ou des pailles conduit à une exportation nette de matière, et donc d'éléments-traces. Selon la teneur dans les parties récoltées et le rendement, les flux exportés par les récoltes seront donc variables.

Comme il n'y a pas eu sur le réseau d'apports d'oligoéléments ou d'utilisation de produits phytosanitaires contenant des métaux, les seuls apports à la parcelle proviennent de la fertilisation. Les engrais phosphatés et les produits résiduaux organiques sont les intrants qui présentent les concentrations en éléments-traces les plus élevées. Nous avons donc analysé les flux en fonction du mode de conduite (conventionnel ou biologique) et de la fertilisation : minérale azotée seule (N), minérale complète (NPK) ou organique. Pour calculer ces flux, il nous faut les itinéraires de culture, avec les quantités apportées pour chaque intrant, et les rendements des cultures. Il faut également que les limites de quantification du laboratoire d'analyse ne soient pas inférieures aux concentrations retrouvées dans les végétaux. Malheureusement, nous n'avons pas pu disposer de ces données pour la totalité des parcelles et des années. Seuls 64 cas ont pu être analysés et sont synthétisés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Récapitulatif des flux d'éléments-traces d'origine agricole calculés en fonction du mode de conduite (conventionnel ou biologique) et de la fertilisation

Culture	Pratiques	n	As (g/ha)	Cd (g/ha)	Cu (g/ha)	Pb (g/ha)	Zn (g/ha)
Blé dur	Conventionnel/ Fertilisation N	7	-0,11	-0,5	-26,8	-0,19	-153
	Conventionnel/ Fertilisation NPK	11	1,6	2	-24,6	0,68	-123
Blé tendre	Conventionnel/ Fertilisation N	44	-0,09	-0,03	-26	-0,94	-160
	Conventionnel/ Fertilisation NPK	17	1,38	2,38	-15,46	0,02	-86
	Biologique/ Ferti. organique	15	5,61	1,28	15	12,3	75
Tournesol	Conventionnel/ Fertilisation N	9	-0,05	-0,87	-30,6	-0,1	-86
	Conventionnel/ Fertilisation NPK	8	1,67	1,83	-27,68	0,55	-56

Quelle que soit la culture, une fertilisation minérale uniquement azotée conduit à un bilan négatif. Les pratiques agricoles ne conduisent pas à une accumulation d'éléments-traces dans les sols dans ce cas. A l'opposé, une fertilisation organique conduit systématiquement à un bilan positif, avec une accumulation dans les sols pour tous les éléments-traces analysés.

La fertilisation minérale phosphatée, quel que soit l'engrais utilisé, va entraîner, quelle que soit la culture, une accumulation d'éléments-traces non essentiels (As, Cd, Pb) mais un déficit d'oligoéléments (Cu, Zn).

Plus que la nature de la culture, c'est le type de fertilisation qui aura une influence sur les flux d'éléments-traces à la parcelle. La reproduction des mêmes pratiques plusieurs années de suite sur la même parcelle ne peut qu'exacerber ces tendances. La seule utilisation d'une fertilisation organique peut donc conduire à une augmentation des teneurs en éléments-traces des sols.

Dans le Tableau 2, nous avons calculé pour des monocultures, sur toutes les parcelles suivies, des flux sur 10 ans, en sommant les intrants (I), les retombées atmosphériques (RA) et en soustrayant les exportations sous forme de grains ou graines (EG), rapportés au stock d'éléments dans l'horizon de surface du sol (S0-30). Le drainage (lessivage+lixiviation) a été négligé et pourrait limiter cette accumulation.

Nous obtenons ainsi, pour une culture et un type de fertilisation, des variations (Vstock), exprimées en pourcentage du stock total.

$$V_{\text{stock}} = 10 * \frac{I + RA - EG}{S0 - 30}$$

Les résultats montrent que pour une fertilisation minérale uniquement azotée, le bilan pour tous les éléments est proche de l'équilibre ou déficitaire, en fonction du type de culture. Le sol va alors avoir une concentration invariante, voire légèrement à la baisse.

Pour les parcelles conduites en fertilisation minérale NPK, les bilans sont à l'équilibre ou négatifs pour l'arsenic, le cuivre, le plomb et le zinc mais ils peuvent être positifs pour le cadmium. C'est pour cet élément que l'on enregistre les augmentations de stock les plus élevées qui conduiraient à un doublement des stocks en 130 ans. Une fertilisation minérale NPK et une culture de blé tendre qui exporte peu de cadmium conduisent à ces fortes accumulations.

Pour les oligoéléments cuivre et zinc, le stock diminue pour toutes les cultures, sauf dans le cas de fertilisation organique élevée. Sans apport de fertilisation organique, les sols vont avoir tendance à s'appauvrir en oligoéléments.

A l'inverse, une fertilisation uniquement azotée et des cultures accumulatrices de cadmium, telles que le tournesol ou le blé dur, vont lentement appauvrir les sols en cadmium.

Tableau 2 : Proportion de variation du stock d'éléments-traces du sol (Vstock) liée aux pratiques agricoles et retombées atmosphériques calculée pour 10 ans en monoculture avec la même fertilisation. Le drainage (lessivage + lixiviation) est négligé.

		N	%	As	Cd	Cu	Pb	Zn
Tournesol	Fertilisation minérale N	4	Min	0	-1.4	-0.7	0	-0.7
			Max	0	-0.02	-0.4	0	-0.1
	Fertilisation minérale NPK	4	Min	0.01	0.1	-0.1	0	-0.2
			Max	0.04	0.2	-0.3	0.01	-0.1
Blé dur	Fertilisation minérale N	6	Min	0	-0.2	-0.7	-0.01	-1.1
			Max	0	0.1	0	0	-0.1
	Fertilisation minérale NPK	7	Min	0.02	0.9	-0.3	0	-0.8
			Max	0.05	2.8	-0.1	0.1	-0.1
Blé tendre	Fertilisation minérale N	37	Min	-0.01	-0.5	-0.9	-0.1	-1.4
			Max	0	0.7	-0.1	0	-0.2
	Fertilisation minérale NPK	16	Min	0	-0.03	-0.5	-0.02	-0.8
			Max	0.5	7.9	0	0.01	0.1
	Fertilisation organique	11	Min	0	-0.1	-0.1	0.01	-0.7
			Max	2.2	4.4	11.7	1.6	10

Dans les systèmes agricoles, les cultures sont incluses dans des rotations avec des itinéraires culturaux qui varient d'une année sur l'autre. L'objectif initial était donc de pouvoir suivre les différentes cultures sur la même parcelle plusieurs années de suite. Mais, en raison d'aléas climatiques ou agronomiques et des impondérables expérimentaux, nous n'avons réussi ce suivi que sur cinq parcelles seulement, toutes recevant une fertilisation minérale, pour une période de trois ans ou plus.

Les graphiques de la Figure 3 présentent les résultats pour le cadmium et le cuivre dans l'exemple de deux parcelles. Cette analyse confirme une lente diminution du stock des oligoéléments (les résultats sont les mêmes pour le zinc). Pour le cadmium, la situation dépend de l'usage ou non de fertilisants phosphatés. Cette fertilisation entraîne un apport de cadmium qui n'est pas compensé par les exportations de grains. Si cette fertilisation phosphatée est répétée chaque année, cela conduit à une augmentation progressive du stock. Par contre, dans le cas d'une fertilisation uniquement azotée, comme c'est le cas sur la parcelle CL, les exportations via les récoltes entraînent une diminution du stock de cadmium. Ainsi, pour limiter l'augmentation des stocks de cadmium, il est à conseiller de mieux raisonner la fertilisation phosphatée.

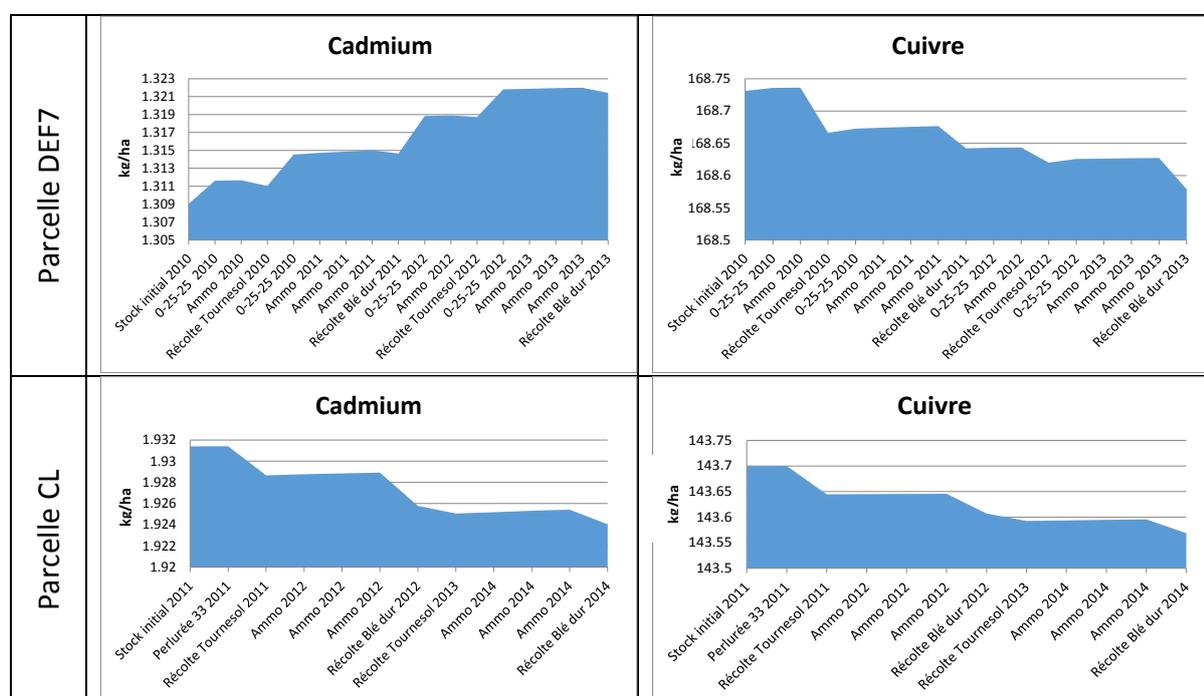


Figure 3 : Suivi des flux de cadmium et de cuivre dans l'exemple de deux parcelles du réseau.

1.5 Analyse des mycotoxines et de la flore fusarienne

Au cours de ce projet, nous avons reçu et analysé 79 échantillons dont 13 de blé dur et 66 de blé tendre. Ces échantillons sont issus des récoltes 2015, 2016 et 2017. Dix-neuf résidus (tournesol, maïs, blé, moutarde, pois, colza et orge) ont été également collectés et analysés en 2015 et 2016 sur ces mêmes parcelles.

Les grains de blé et résidus ont été collectés à partir de parcelles issues du réseau Quasaprove. Les échantillons après broyage ont été analysés pour leurs teneurs en mycotoxines par HPLC-DAD, et leur population fusarienne et microdichienne a été quantifiée par PCR en temps réel en technologie TaqMan.

Les 79 échantillons de grains de blé et 19 résidus collectés en 2015, 2016 et 2017 ont été analysés pour leur composition en flore fusarienne (*F. graminearum*, *F. poae*, *F. avenaceum*, *F. culmorum*, *F. tricinctum*, *F. langsethiae*, *F. sporotrichoides*) et Microdichienne (*M. majus* et *M. nivale*), ainsi que pour leur teneur en trichothécènes de type B.

Pour les trois années d'échantillonnage, il y avait très peu ou pas de trichothécènes de type B. Seulement deux échantillons de grains de blé récoltés en 2016 contenaient des trichothécènes B sur les 79 analysés, avec des teneurs au-dessus de la réglementation (10360 ppb et 2250 ppb).

Nous observons qu'en 2015 et 2016, *Microdochium majus* puis *M. nivale* sont très majoritairement présents par rapport à la population fusarienne sur les échantillons de grains de blé.

Au sein de la population fusarienne en 2015, on a majoritairement du *F.poa* et en 2016 du *F. graminearum*. En 2017 les grains étaient peu contaminés en *Fusarium* et en *Microdochium*. L'espèce fongique dominante sur les échantillons contaminés en 2017 est *F. graminearum*. On observe que pour les résidus non céréaliers (pois, tournesol, moutarde, etc.) nous avons peu ou pas de contamination fusarienne. Les résidus les plus contaminés sont ceux du maïs, avec la plus grande diversité d'espèces fusariennes. Sur les résidus de maïs, on a la présence de *Microdochium majus* et *M. nivale*.

1.6 Caractérisation des niveaux de résidus de pesticides dans les sols

Une cartographie des niveaux de résidus de pesticides a été établie pour les 32 parcelles sélectionnées. 18 de ces parcelles sont conduites en mode conventionnel et les 14 autres en mode biologique. Les traitements réalisés sur ces parcelles en 2016 et en 2015 sont connus, tout comme les années de conversion en biologique. Les analyses de résidus ont été faites sur les échantillons de la première campagne d'échantillonnage (de mi-février à début avril), mais certains traitements phytosanitaires avaient déjà été réalisés (ils sont néanmoins connus); cela concerne 10 des 18 parcelles en mode conventionnel.

Bien que plus d'une centaine de pesticides aient été suivis, seuls les résultats obtenus pour 34 pesticides sont présentés. Les critères de sélection de ces composés sont i) en tout premier lieu, leur utilisation passée et/ou présente sur les parcelles du réseau Quasaprove, ii) leur détermination par des méthodes analytiques dites multi-résidus et iii) des limites de quantification (LQ) très basses (LQ < 2 ng/g de poids sec (ps)) garantissant une comparabilité des résultats au niveau statistique et donc une interprétation pertinente des niveaux de contamination des sols.

Les 34 pesticides suivis sont constitués de 9 fongicides, 21 herbicides, 3 insecticides et 1 régulateur de croissance. De très bonnes performances analytiques ont été obtenues pour ces composés : des taux de récupération dans les sols > 50%, des rendements de quantification (exactitude) compris entre 80 et 120%, une reproductibilité des mesures < 20% et des limites de quantification (LQ) < 0,1 ng/g ps pour 19 pesticides, 0,1 - 0,5 ng/g pour 11 d'entre eux et 0,5 - 2 ng/g pour 4 composés.

Sur ces 32 parcelles, 20 pesticides parmi les 34 suivis ont été détectés au moins une fois (Figure 4). La moitié d'entre eux sont détectés dans plus de 20% des sols et quatre de façon assez systématique (dans plus de 50% des échantillons). Sur chaque parcelle, le nombre de composés détectés s'échelonne de 1 à 14 pesticides.

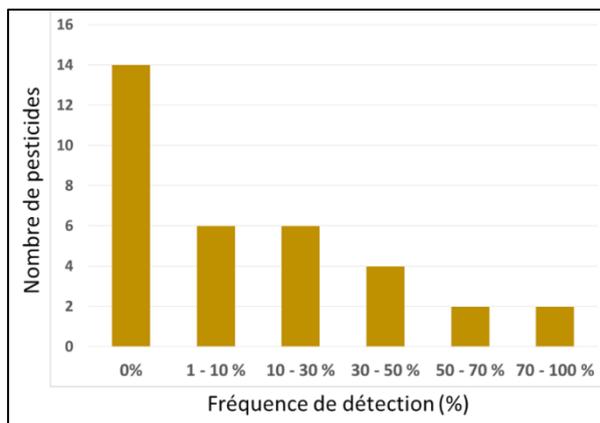


Figure 4 : Fréquence de détection des pesticides suivis sur les 32 parcelles (avril 2016)

Les concentrations cumulées (en ng/g ps) des pesticides sur les parcelles sont représentées dans la Figure 5 en orange pour les parcelles en mode conventionnel (parcelles 1 à 18) et en bleu pour les parcelles en mode biologique (parcelles 19 à 21). Comme attendu, les niveaux observés sont plus élevés en mode conventionnel qu'en mode biologique et s'échelonnent du sub-ng/g à la centaine de ng/g (ps) dans les sols (à l'exception d'une parcelle pour laquelle une concentration totale supérieure à 450 ng/g a été observée). Ces niveaux de concentrations sont comparables à ceux retrouvés dans d'autres sols agricoles (Cruz, 2015).

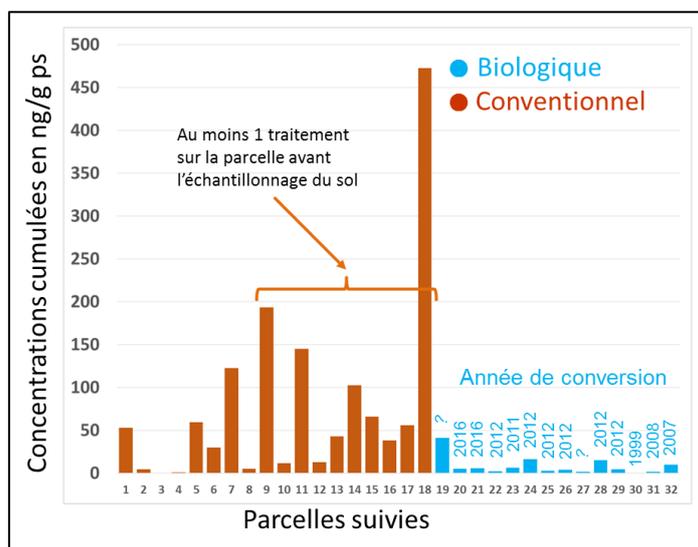


Figure 5 : Concentrations cumulées (ng/g ps) des pesticides sur les parcelles.

En mode biologique, les niveaux moyens observés sont faibles mais néanmoins significatifs (environ 8 ng/g ; Tableau 3), la plus ancienne parcelle (convertie en 1999) présentant le niveau le plus bas (trace d'époxiconazole). La parcelle 19 présente un profil plus atypique (10 résidus détectés) et une concentration totale plus élevée (40 ng/g ps). En mode conventionnel, les niveaux cumulés moyens sont d'environ 80 ng/g ; en ne considérant que les parcelles n'ayant subi aucun traitement avant l'échantillonnage (n°1 à 8), les niveaux moyens sont de l'ordre de 30 ng/g (Tableau 3), ce qui reflète l'empreinte en résidus de pesticides des sols de grandes cultures.

Tableau 3 : Récapitulatif des flux d'éléments-traces d'origine agricole calculés en fonction du mode de conduite (conventionnel ou biologique) et de la fertilisation

32 échantillons	Conventionnel			Conventionnel (sans traitement réalisé avant l'échantillonnage)			Biologique		
	Moyenne (ng/g ps)	Médiane (ng/g ps)	Min - Max	Moyenne (ng/g ps)	Médiane (ng/g ps)	Min - Max	Moyenne (ng/g ps)	Médiane (ng/g ps)	Min - Max
Pesticides totaux	78,7	47,8	0,1 - 472,9	34,4	17,7	0,1 - 122,5	8,4	5,1	0,5 - 41,2
Fongicides	12,2	6,0	0 - 44,7	9,2	1,8	0 - 31,5	5,3	4,2	0 - 15,1
Herbicides	66,2	26,0	0 - 428,2	24,7	10,9	0 - 122	3,0	0,7	0 - 31,2
Insecticides	0,3	0,0	0 - 3,9	0,5	0,0	0 - 3,9	0,1	0,0	0 - 0,5

Par comparaison des modes de production conventionnel et biologique, les herbicides (de loin les plus utilisés) sont présents de façon marquée en conventionnel et quasi absents en biologique (Tableau 3 et Figure 6). En mode biologique, les fongicides prédominent. Cela s'explique par leurs propriétés physico-chimiques, les fongicides étant généralement des molécules hydrophobes, moins lessivables et moins dégradables que les herbicides (généralement hydrophiles) et donc plus rémanentes dans les sols. Le

niveau plus élevé observé sur la parcelle biologique n°19 s'explique par un profil atypique avec une prédominance des herbicides. La présence de pesticides sur les parcelles en mode biologique peut s'expliquer i) par la rémanence de certaines molécules dans les sols (comme indiqué précédemment pour les fongicides), héritage du passé, et ii) par le phénomène de dérive atmosphérique des pesticides lors de leur application sur des cultures conduites en mode conventionnel dans le voisinage de parcelles biologiques (voire entourant ces parcelles). Ce dernier point est en cours d'approfondissement en collaboration avec le partenaire INRA ISPA pour mettre potentiellement en évidence un lien entre les niveaux observés en biologique et leur proximité avec des parcelles en mode conventionnel (notamment pour les parcelles 19 et 27).

Les fongicides sont présents en biologique à des concentrations significativement supérieures aux limites de quantification et il est observé que les niveaux de fongicides sont relativement similaires en biologique et en conventionnel dit raisonné (compris entre <LQ et 15 ng/g), ce qui n'est pas le cas des itinéraires plus consommateurs de pesticides observés.

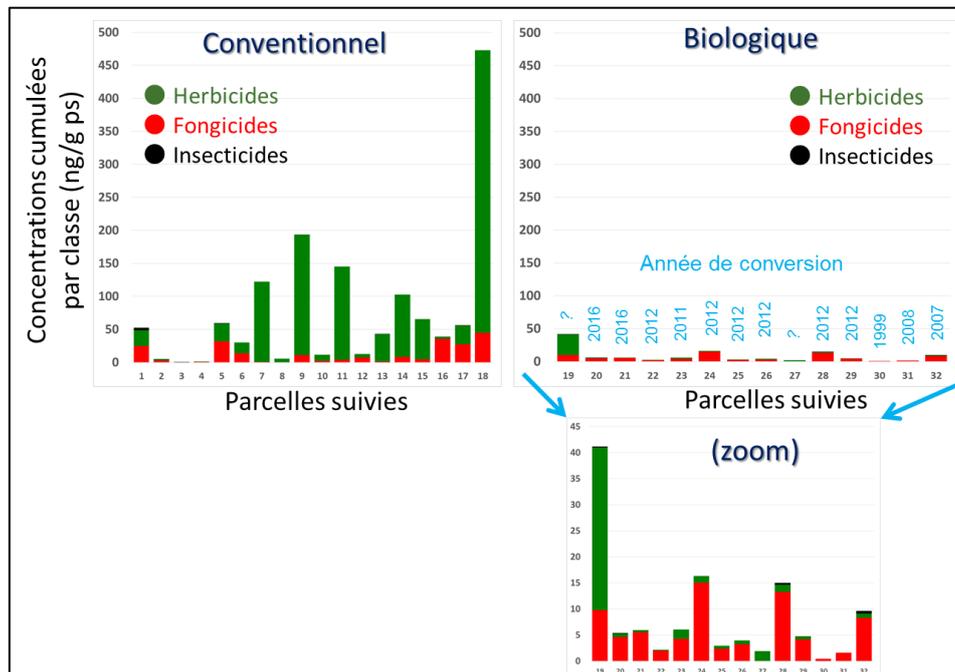


Figure 6 : Concentrations cumulées (ng/g ps) des pesticides sur les parcelles

Au niveau individuel, les fréquences de détection (%) par pesticide suivi sont représentées sur la Figure 7. Comme indiqué précédemment, dix pesticides sont détectés dans plus de 20% des sols et dans plus de 50% des sols pour quatre d'entre eux : époxiconazole et tébuconazole (fongicides) et diflufenican et isoproturon (herbicides). Cette détection quasi-systématique dans les sols s'explique par leur rémanence dans les sols (à l'exception de l'isoproturon) comme en témoignent leurs temps de demi-vie élevés (DT50Sol comprises entre 140 et 365 jours).

Tous modes de conduite confondus, les deux pesticides retrouvés aux concentrations les plus élevées dans les sols sont la pendiméthaline et le diflufenican (herbicides). Lorsqu'elle est détectée (20% des parcelles), les niveaux élevés de pendiméthaline peuvent s'expliquer par sa persistance dans les sols et sa très forte affinité pour la matière organique des sols (DT50Sol de 180 jours et Koc de 17500 L/kg). Si l'on fait abstraction de ces deux composés, on retrouve des concentrations de pesticides de l'ordre du ng/g ps à la dizaine de ng/g, relativement faibles mais néanmoins quantifiables et potentiellement à risque à long terme pour les organismes du sol.

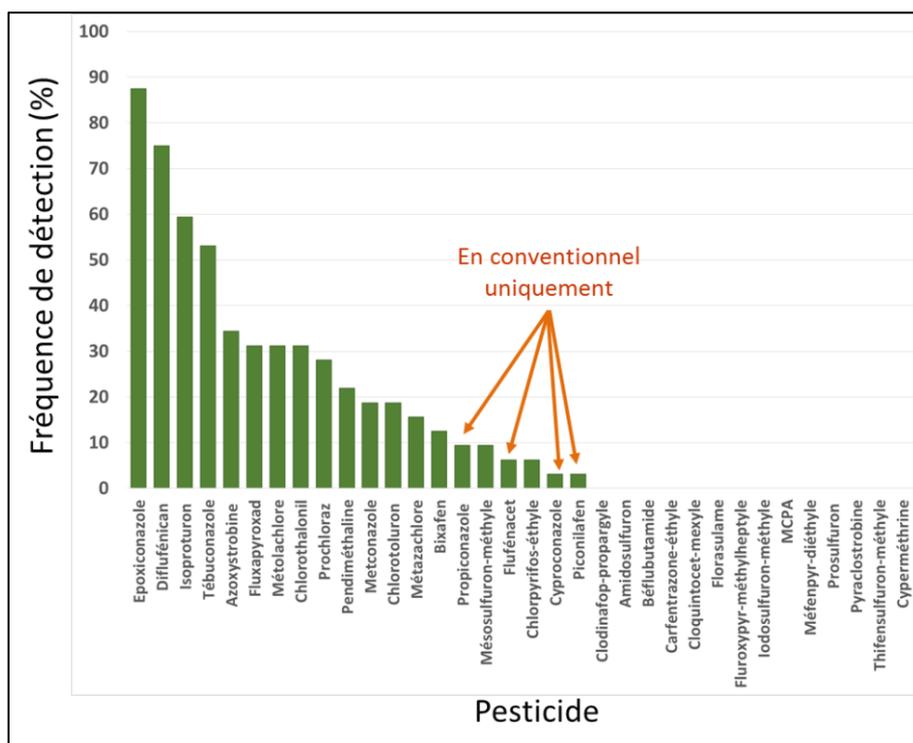


Figure 7 : Fréquence de détection par pesticide suivi

Les empreintes moléculaires sont néanmoins très différenciées entre le mode conventionnel et le mode biologique (Figure 8). En mode biologique (à droite), certains résidus ne sont jamais détectés (marqués par des flèches bleues). L'époxiconazole, détectée dans presque 90% des sols en mode conventionnel comme en mode biologique, est présente aux plus fortes concentrations (0,5 - 12 ng/g). Comme discuté précédemment, ce fongicide est relativement persistant dans les sols, persistance que l'on pourrait évaluer à plus de 10 ans au vu des dates de conversion en biologique des parcelles suivies. En mode conventionnel (à gauche), les pesticides détectés ont été distingués sur la Figure 8 entre ceux qui n'ont pas été utilisés l'année précédant le prélèvement (marqués d'un astérisque) et ceux qui l'ont été en 2015 et/ou en 2016 avant le prélèvement (en orange) (en se basant sur les itinéraires techniques renseignés). Parmi ceux non utilisés l'année précédente et détectés dans les sols, on retrouve quasi-exclusivement des fongicides, à l'exception d'un insecticide (chlorpyrifos-éthyle) et d'un herbicide, la pendiméthaline. En conventionnel, l'empreinte de contamination est dominée par la pendiméthaline (alors que ce n'est pas le cas en mode biologique). Le diflufenican, utilisé en 2015 et 2016, est également observé à des concentrations non négligeables.

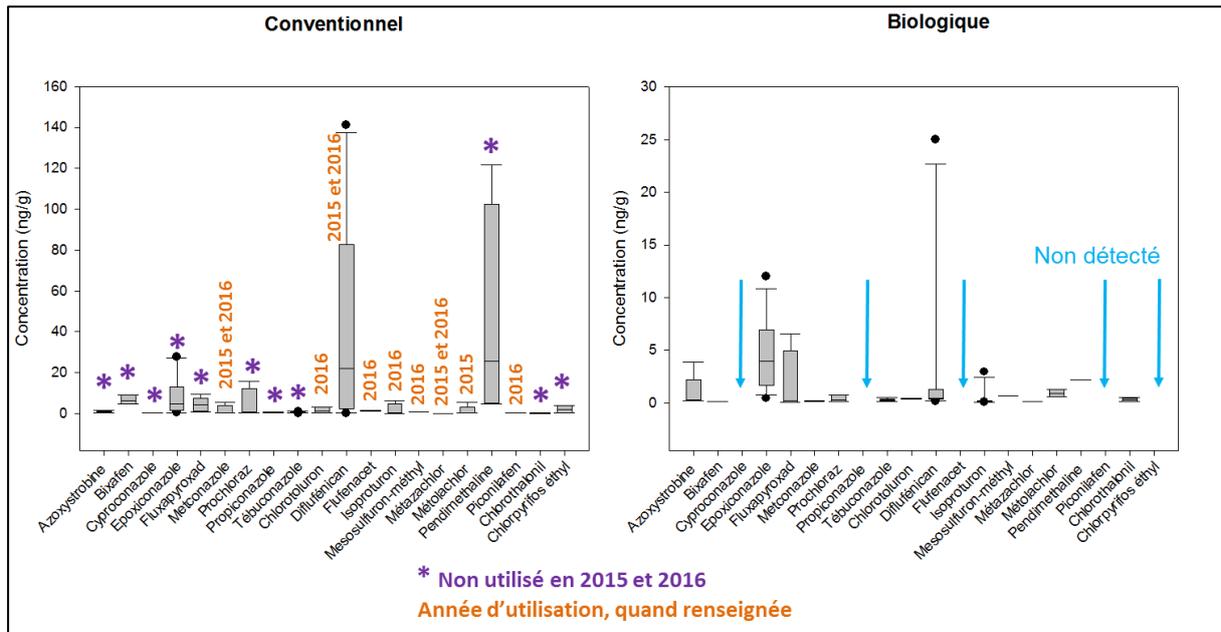


Figure 8 : Niveaux de concentrations (ng/g) des pesticides détectés sur les parcelles en mode conventionnel ou biologique

2. Effet des itinéraires techniques et rôle des matières organiques exogènes ou recyclées sur la parcelle

Les analyses statistiques n'ont pu être réalisées que pour le blé tendre car nous n'avons pas d'effectifs suffisants pour les autres cultures.

Comme c'était attendu, il n'y a aucune relation entre la teneur totale en un élément dans le sol et la concentration dans le grain de blé ou la graine de tournesol, quel que soit l'élément considéré. Ce manque de relation est aussi observé pour les pailles et pour les végétaux au stade jeune. Cette observation est normale car, plus que la teneur totale, il faut considérer la teneur biodisponible, à savoir la quantité de métal susceptible de passer en solution et d'être prélevé par le végétal.

2.1 Effet des pratiques culturales

2.1.1 Effet du rendement

Nous avons cherché à tester s'il existait une relation entre le rendement et la teneur en un élément dans le grain ou la graine. Il faut distinguer ici le cas des oligoéléments cuivre et zinc des autres éléments-traces. Pour ces deux éléments, un effet de dilution a été mis en évidence : quelle que soit la plante, plus le rendement est élevé, plus la concentration en cuivre et en zinc dans les grains et graines est faible. Cette observation est également valable pour les éléments majeurs P, K et Mg. Pour les autres éléments-traces, il n'y a aucune relation entre le rendement et la concentration dans les grains ou graines.

2.1.2 Effet du labour

Nous avons testé l'effet du labour en analysant séparément, pour le blé tendre, les 26 parcelles non labourées des 62 parcelles labourées. Aucune différence n'est apparue, quel que soit l'élément considéré.

2.1.3 Effet de la fertilisation

Certaines publications ont mis en évidence des relations entre la nutrition azotée et la teneur en cadmium. Nous avons donc cherché si la dose d'azote apportée, recalculée à partir des données de l'enquête, pouvait influencer sur la concentration en éléments-traces dans le grain de blé. Aucune relation n'a pu être mise en évidence, quel que soit l'élément. Au champ, il n'y a donc pas de relation entre la fertilisation azotée et la teneur en ETM dans le grain de blé.

Les phosphates étant connus pour apporter des éléments-traces, nous avons également analysé l'effet éventuel de la fertilisation phosphatée. Là encore, il n'y a aucune relation entre la dose de phosphore apportée et la teneur en éléments-traces dans le grain de blé. L'analyse en fonction de la fertilisation potassique a conduit à la même conclusion.

2.1.4 Effet du précédent

Nous avons ensuite analysé l'effet du précédent. Là encore, aucune différence significative n'est apparue, quel que soit l'élément considéré.

2.1.5 Effet de la présence d'une interculture

Nous avons tout d'abord cherché à vérifier s'il y avait un effet de l'inter-culture en comparant les sites pratiquant une inter-culture aux sites laissant le sol nu. Aucune différence significative ne s'est dégagée.

2.2 Effet d'apports de matières organiques

2.2.1 Effet d'une fertilisation organique sur la composition chimique des grains de blé tendre à l'échelle du réseau

A partir des données du réseau, nous avons testé si des différences apparaissaient entre le niveau de contamination des récoltes dans les parcelles fertilisées avec des fertilisants minéraux ou organiques. Aucune différence significative n'a été mise en évidence, quel que soit l'élément analysé.

2.2.2 Effet d'un apport de matières organiques issues de résidus de culture en conditions contrôlées

Nous avons étudié l'influence de la minéralisation des résidus de culture sur la disponibilité des métaux. Pour cela, nous avons incubé un sol agricole, choisi parmi les sols du réseau et cultivé depuis plus de 10 ans en agriculture biologique, en présence de résidus de culture différents (tiges de tournesol, cannes de maïs, parties aériennes de moutarde et paille de blé) pendant deux mois. Nous avons suivi l'activité microbienne (respiration du sol, activité de la β -glucosidase), la chimie de la solution du sol (pH, concentration en carbone soluble, sulfate, nitrates, cadmium, cuivre, plomb et zinc) et la disponibilité des cations métalliques par l'utilisation d'un capteur passif (DGT).

Après 2 mois, 18% du carbone de la moutarde et 40% du carbone des autres résidus ont été minéralisés. L'activité de la β -glucosidase varie selon les résidus : elle augmente rapidement pour le maïs, le blé et le tournesol et seulement après un mois pour la moutarde. Les résultats montrent une modification importante du pH du sol et de la solution du sol, variable selon les résidus. Le carbone organique dissous augmente rapidement pour tous les résidus dès le premier jour d'incubation et revient à la valeur du sol témoin après 2 mois. Pour tous les métaux, un pic de concentration en solution est observé après la première journée d'incubation. Ensuite, le comportement des métaux est variable, selon le résidu et le métal. La concentration en zinc reste élevée pendant deux mois alors que la concentration en cuivre revient au niveau de la valeur du témoin après un jour. Ces différences sont vraisemblablement liées aux différences d'affinité des métaux vis-à-vis de la matière organique.

Cette étude préliminaire a permis de démontrer que l'incorporation de résidus de culture dans un sol agricole modifiait rapidement les équilibres géochimiques et influait sur la disponibilité des métaux présents dans les sols. En particulier, nous avons démontré l'effet important de l'enfouissement de résidus de moutarde, végétal largement utilisé comme engrais vert. Cette première étude est à valider dans d'autres sols et en conditions de terrain afin de vérifier cette modulation de la disponibilité des métaux en fonction de la dégradation des matières organiques incorporées aux sols.

Cependant, cet effet à court terme ne semble pas avoir d'effet à long terme sur l'accumulation dans le végétal, puisqu'aucune relation n'est apparue entre le niveau de contamination du végétal à la récolte et le précédent cultural.

2.3 Activités microbiennes et systèmes de culture

Sur la base du réseau de parcelles suivi de longue date par le RMT Quasaprove, un « sous-réseau » de parcelles a été identifié pour répondre à la question d'effet de systèmes de culture (SdC) sur des activités microbiennes et enzymatiques du sol. Ce sous-réseau inclut des parcelles agricoles sous blé en 2016, gérées par des unités expérimentales de l'INRA, des lycées agricoles, ainsi que par ARVALIS-Institut du végétal. Sur chaque site, deux systèmes de culture ont été suivis au cours de la saison culturale 2016 : une parcelle en agriculture conventionnelle et une autre en agriculture biologique ou en zéro-pesticide (0Pest).

Les différentes activités microbiennes ont été mesurées sur des échantillons « frais », c'est-à-dire dans les 72h suivant le prélèvement, au sein du laboratoire EcoSys. Des activités enzymatiques extracellulaires (AEE) en relation avec l'acquisition de nutriments (C, N, P, S) ont été mesurées par la plateforme BiochemEnv de l'Unité EcoSys (INRA) : β -D-Glucosidase, Phosphatase, Aryl-sulfatase, Aryl-amidase, Uréase. L'activité nitrifiante, étape clef de la minéralisation de l'azote en régulant l'équilibre entre la forme ammoniacale et nitrique de l'azote, a été mesurée au laboratoire EcoSys.

Les résultats présentés ci-après sont interprétés en fonction du système de culture : conventionnel (Conv), agriculture biologique (Bio), ou zéro Pesticide (0Pest). Les systèmes de culture Bio et 0Pest ont parfois été rassemblés sous le terme « bas_intrants » et opposés au conventionnel. Les résultats sont tout d'abord présentés pour chaque activité microbienne en fonction du système de culture, au cours du temps et tous sites confondus (Figure 9).

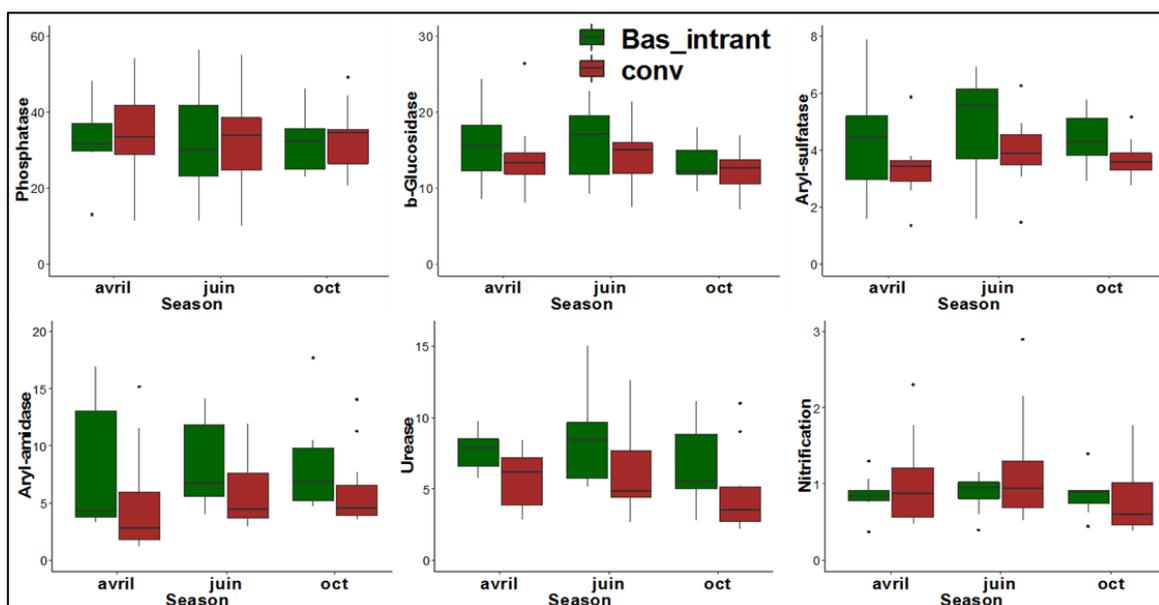


Figure 9 : Niveaux de concentration (ng/g) des pesticides détectés sur les parcelles en mode conventionnel ou biologique

Pour les activités phosphatase, glucosidase et nitrifiante, peu de différences sont observables entre les différents systèmes étudiés. Une activité glucosidase plus élevée est uniquement observée au printemps en SdC bas-intrants. En revanche, les activités aryl-sulfatase, uréase et aryl-amidase sont supérieures en système de culture bas-intrants (biologique et OPest) par rapport au conventionnel, aux différentes saisons.

Deux indices enzymatiques dérivés des mesures d'activités enzymatiques β -glu, Phos, Aryl_S, Aryl_N, Ure, sont présentés en Figure 10. La moyenne géométrique permet d'avoir une mesure globale du niveau d'activités microbiennes toutes enzymes confondues. Cet indicateur, bien que global, permet de mettre en évidence une activité microbienne supérieure en système biologique et OPest par rapport au conventionnel, significatif pour le mois d'avril. Cela ne traduit pas nécessairement un meilleur recyclage des nutriments. En effet ces résultats pourraient indiquer des biomasses microbiennes plus importantes en système Bio et OPest, associées à des besoins microbiens accrus en nutriments, d'où la production d'enzymes.

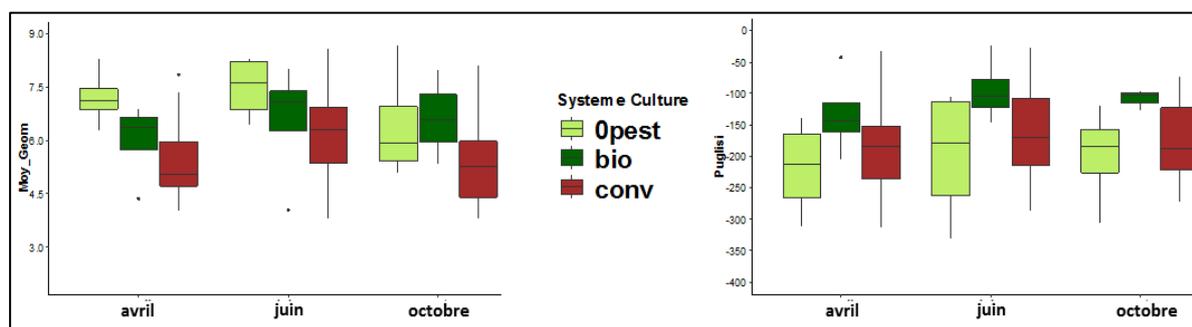


Figure 10 : Indices enzymatiques (moyenne géométrique et indice de Puglisi) dans les sols des parcelles sous conduite conventionnelle et « Biologique ou OPest », en fonction de la saison d'échantillonnage.

A l'inverse l'indice de Puglisi (indice de stress : plus les valeurs sont négatives et moins le milieu est perturbé, Puglisi et al., 2006) ne révèle aucune différence entre les systèmes de culture. Cet indice trouve peut-être une limite d'applicabilité ici (effets de systèmes de culture et pratiques agricoles), car il a été développé prioritairement sur des contextes de pollution métallique et HAP en friches industrielles et sols marginaux.

D'une manière générale, il semble que les systèmes bas intrants favorisent l'activité microbienne des sols, par rapport aux systèmes conventionnels. Ces effets bénéfiques sont d'origine multifactorielle et ne peuvent se réduire à la seule diminution des intrants. Ainsi, en système de culture biologique et OPest, il y a souvent un allongement des rotations et une diversification des couverts, avec des inclusions de cultures intermédiaires (dont présence de légumineuse). De la fertilisation organique peut également substituer la fertilisation inorganique. Egalement, il faut voir qu'avec cette approche globale, la forte variabilité des contextes pédoclimatiques locaux, qui induit une très forte hétérogénéité entre les activités microbiennes de différents sites, n'est pas prise en compte. En fait, quel que soit le système de culture (comme c'est le cas pour le rendement), certains sols offriront toujours un milieu (habitat) plus favorable à la vie du sol. Ainsi une approche s'intéressant aux différences entre systèmes bas-intrants et conventionnels sur chaque site, avant de globaliser l'information, pourrait être plus discriminatoire pour tester les bénéfices des systèmes de culture biologique ou OPest sur l'activité biologique des sols de grandes cultures.

Des analyses statistiques, reliant les variations d'activités microbiennes aux modifications des itinéraires techniques et des paramètres pédoclimatiques entre les sites et les parcelles, ont été réalisées pour essayer d'identifier certains facteurs influençant les activités. Pour se faire, nous avons choisi de réaliser des analyses de régressions multiples entre les valeurs d'activités microbiennes et les paramètres édaphiques et climatiques ainsi que les caractéristiques des systèmes de culture (pratiques:

travail du sol, traitements phytosanitaires, fertilisation, restitution des résidus, diversité des cultures, présence de légumineuses). Cela a été fait sur l'année 2017 et les 5 années passées afin d'intégrer les effets à long terme. Pour cela, une valeur moyenne d'activité annuelle a été considérée.

Des analyses de régressions linéaires multiples indiquent que ce sont majoritairement des paramètres du sol et la température qui influencent le plus les niveaux d'activité. Parmi les paramètres édaphiques majoritaires identifiés pour plusieurs activités et pour la moyenne géométrique globale, il y a l'azote total et le pH, suivi en second lieu par la texture des sols et certains des éléments majeurs (calcium, potassium ou manganèse). Les teneurs en carbone n'ont pas une forte influence dans cette étude. Plusieurs éléments-traces (aluminium, cadmium, cuivre, arsenic) contribuent significativement pour certaines enzymes.

En ce qui concerne les pratiques différenciant les systèmes OPest, biologiques et conventionnels, c'est principalement le labour (effet négatif) ou le travail superficiel du sol (effet positif) qui influence les activités.

La pratique de fertilisation organique (fumier, lisier, compost) apparaît comme un facteur favorisant l'activité microbienne particulièrement dans les parcelles conventionnelles. Les intrants organiques favorisent plus particulièrement la glucosidase, phosphatase, aryl_amidase et uréase.

En revanche, les apports de fertilisants minéraux azotés en SdC conventionnel et OPest (ammonitrate) favorisent la nitrification.

L'indice de fréquence de traitements pesticides, la diversité de la rotation des systèmes de culture et l'occurrence de légumineuses dans la rotation, n'influencent pas significativement les activités microbiennes, dans ce lot de parcelles.

L'âge de la conversion des systèmes de culture en biologique ou OPest pourrait expliquer l'amplitude des effets observés, mais aucune corrélation n'a été mise en évidence quelle que soit l'activité considérée.

D'une manière générale, pour une telle comparaison, où la diversité des systèmes de culture locaux ou régionaux est très importante, il faudrait échantillonner beaucoup plus de sites dans différentes régions, pour augmenter la puissance statistique de cette approche. Cela permettrait d'identifier les systèmes de culture (et les caractéristiques de ces systèmes) qui influencent le plus les activités et d'analyser des disparités régionales (en relation avec les contextes pédo-climatiques).

2.4 Dégradation microbienne des pesticides

Certaines parcelles étudiées pour les activités biologiques ont été retenues pour l'étude de la dégradation microbienne des pesticides réalisée en 2017. Ont été sélectionnées les parcelles localisées sur des luvisols afin de s'affranchir du facteur texture des sols, qui influence fortement les processus de dégradation des pesticides en modulant leur biodisponibilité pour les microorganismes qui les dégradent. Un autre critère de choix a été l'intensité d'usage de pesticides (dose et fréquence) sur les 5 à 10 années passées. Sur chaque site et comme précédemment, des parcelles en système de culture conventionnel et biologique ou OPest ont été sélectionnées.

Les pesticides figurant dans les itinéraires techniques, qui présentaient une récurrence d'apport élevée et/ou identifiés comme potentiellement rémanents dans des sols (DT50 élevée) ou ayant été détectés dans les sols d'après les analyses antérieures de 2016, ont été choisis pour les expérimentations de radio-isotopie. Un dernier critère a également concerné leur ubiquité entre les différents sites, pour permettre des comparaisons exhaustives.

L'analyse (quantitative et qualitative) des passifs d'application de pesticides (depuis 2007) sur les parcelles (conventionnel et OPest avant leur conversion en 2012) et des résidus de pesticides dans les

sols, a permis d'identifier un ensemble de molécules candidates pour ces analyses de dégradation en laboratoire : isoproturon, glyphosate, 2,4-D, pendiméthaline, diflufenican, metsulfuron-méthyl, S-métholachlor, époxiconazole, chlorthalonil. Du fait de la lourdeur de ce type d'approche et du coût des expérimentations (molécules marquées au ^{14}C et retraitement des déchets radioactifs), un nombre restreint de molécules de pesticides a été retenu.

Les expérimentations ont été réalisées en 2017 sur la plateforme de radio-isotopie de l'unité EcoSys (Inra). Les sols des parcelles échantillonnées ont été préparés au laboratoire (ressuyés et tamisés à 5mm, puis stockés à 4°C jusqu'à expérimentation).

Le dispositif expérimental a consisté en un microcosme de 10g de sol, contaminé au laboratoire avec le pesticide d'intérêt marqué au carbone 14 (^{14}C), puis équilibré à une humidité de 80% du pF 2,5 pour maximiser l'activité microbienne. Le sol est disposé dans un contenant avec un autre contenant rempli de soude et un autre d'eau, le tout dans un bocal fermé hermétiquement.

Le marquage au ^{14}C des pesticides permet en effet de suivre leur devenir (minéralisation, dégradation, résidus extractibles, résidus liés non-extractibles) au cours de l'incubation des sols et d'avoir un bilan de masse final. Le dispositif est incubé 60 jours à 28°C , avec un suivi bi-hebdomadaire pour le changement de la soude pour la mesure du CO_2 venant de la minéralisation de la matière organique du sol (CO_2 non marqué au ^{14}C) et de la minéralisation du pesticide ($^{14}\text{CO}_2$) par les communautés microbiennes. Cette activité de minéralisation des pesticides a été interprétée au regard des passifs de traitement (intégrés via l'indicateur de fréquence de traitement : IFT) de certaines molécules ou de l'ensemble des molécules épandues. Les paramètres physico-chimiques, biologiques et climatiques des sols ont aussi été considérés.

2.4.1 Activité de minéralisation

La fraction minéralisée de pesticide par la vie microbienne est un indicateur essentiel indiquant la capacité d'un sol à dissiper totalement un produit chimique toxique. La fraction minéralisée est la seule des fractions représentées en Figure 11, permettant d'affirmer qu'une fraction de la toxicité initiale a disparu, du fait de la dégradation totale aboutissant à la minéralisation de la molécule initialement apportée.

C'est l'herbicide 2,4-D qui est le plus minéralisé par les communautés microbiennes de ces sols, avec cependant des écarts compris entre 40% et 60% de minéralisation entre les sites. Une activité de minéralisation légèrement supérieure est observée dans les sols conventionnels. L'herbicide glyphosate est également fortement minéralisé et à des taux très similaires entre les sites (autour de 50% de minéralisation), sauf dans les sols d'un site où le taux de minéralisation est deux fois plus faible. Aucune différence n'existe entre les sols issus de parcelles conventionnelles ou biologiques et OPest.

L'isoproturon est relativement bien minéralisé (30-40%) par les sols des parcelles sous conduite conventionnelle des sites étudiés, par rapport aux parcelles biologiques ou OPest (20%). Cependant, les sols d'un site présentent une activité de minéralisation bien moindre ($< 15\%$) et sans différence OPest vs conventionnel.

La pendiméthaline et l'époxiconazol présentent des faibles taux de minéralisation quels que soient le site et le mode de gestion des parcelles.

2.4.2 Fractions extractibles CaCl_2 et MeOH

Ces fractions représentent des molécules mères ou des produits de transformation (dégradation incomplète) du pesticide initialement apporté, qui sont plus ou moins fortement liés aux particules de sols et matières organiques (ex : résidus de culture). En ce sens, ces molécules sont potentiellement mobilisables par les écoulements d'eau à la surface (ruissellement) ou dans les sols (lixiviation). Ces fractions représentent un risque par rapport aux transferts vers les milieux aquatiques.

Les fractions facilement extractibles (via CaCl₂) sont très peu présentes dans cette étude et concernent les molécules de pesticides les moins minéralisées. Il semblerait donc que cette fraction CaCl₂ soit une fraction de molécules facilement accessibles à la dégradation et à la minéralisation microbiennes.

Pour les fractions extractibles au MeOH, il y a de fortes disparités entre les molécules et parfois entre les sites, mais le mode de culture n'a pas d'influence. La pendiméthaline et l'époxiconazole présentent respectivement des fractions extractibles au MeOH très similaires entre les sols et sites étudiés. Elles atteignent 30 à 40% des molécules initiales pour la pendiméthaline et plus de 80% pour l'époxiconazole. Pour le glyphosate, un site diverge fortement des autres sites avec une fraction MeOH bien plus importante atteignant 60% des molécules initiales contre 20-30% pour les autres. Pour le 2,4-D et l'isoproturon, ces fractions sont très faibles.

2.4.3 Fraction de résidus non-extractibles (RNE)

C'est une fraction qui demeure assez méconnue par la recherche et qui pourrait rassembler deux types de signaux : i) des molécules et/ou produits de transformation des pesticides initiaux, qui seraient très fortement liés et non extractibles des matrices organo-minérales de sols et seraient aussi ii) des atomes de carbone, des molécules initiales qui auraient été incorporés à la biomasse microbienne les ayant métabolisés. Ils pourraient ainsi constituer, selon les pesticides, des formes inertes « stabilisées » et « décomposées » des molécules de pesticides.

Les fractions de RNE les plus importantes sont retrouvées pour l'isoproturon, suivi du 2,4-D et de la pendiméthaline, alors que peu de RNE sont observés pour le glyphosate et l'époxiconazole. Egalement, en dehors de l'isoproturon et du 2,4-D, il n'y a pas de différences d'accumulation de RNE entre les sites, pour un pesticide donné.

Par rapport à nos hypothèses initiales, les minéralisations plus importantes du 2,4-D et de l'isoproturon en système conventionnel, sont corrélées aux fréquences d'usage de ces pesticides (mais aussi à l'IFT global) sur les sols. A l'inverse, ces résultats ne sont pas reliés aux biomasses et activités microbiennes plutôt supérieures en système biologique ou OPest. Cela traduit donc que les pesticides ont induit une adaptation de populations au sein des communautés microbiennes, ce qui entretient un potentiel de dégradation. Ces résultats sont d'autant plus emblématiques pour l'isoproturon qui est connu comme plus persistant que le 2,4-D et souvent détecté dans les eaux de surface (il a été interdit en France à la fin de cette étude en 2017).

Egalement, les communautés microbiennes en système de culture biologique et OPest n'ont pas perdu totalement leurs capacités de minéralisation du 2,4-D et de l'isoproturon, même sur un site où il n'y a pas eu de traitement depuis 18 ans (converti en biologique en 1999). Cela montre que les capacités fonctionnelles des microorganismes peuvent persister et être réactivées.

Dans ce jeu de données (pesticides x sols), il n'y a pas de tendance globale entre les fractions minéralisées (part de pesticide « respiré » par le métabolisme microbien) et les fractions de résidus non-extractibles (qui pourraient être la part de pesticide « assimilé » dans la biomasse microbienne). Cependant, en prenant les cas du 2,4-D et de l'isoproturon, il ressort une très forte corrélation négative entre ces deux fractions, laissant supposer une compétition entre les processus sous-jacents : soit les microorganismes minéralisent fortement les molécules et utilisent d'autres sources de carbone pour croître, soit ils utilisent le carbone des molécules de pesticides qu'ils dégradent pour croître et d'autres sources de carbone pour respirer.

3. Valorisation de la base de données et des connaissances sur les contaminants étudiés

Dans le cadre de la valorisation du projet, un site Internet a été créé, sous la forme d'une plateforme participative (<http://quasaprove.inra.fr>, Figure 11).

A partir des demandes et besoins exprimés sur le terrain par les enseignants de lycées agricoles de disposer de supports d'enseignement, mais aussi des besoins exprimés par les chercheurs de collecter des données sur tout le territoire, a germé l'idée d'une plateforme participative afin de :

- Rendre disponibles et diffuser des informations scientifiques et techniques avec les partenaires du monde agricole sur les contaminations des produits de la récolte,
- Recueillir des données provenant du terrain,
- Co-construire ensemble des expérimentations participatives (notamment avec des étudiants de BTS).

Les échanges avec les enseignants des lycées agricoles et les chefs d'exploitation des fermes expérimentales associées ont aussi permis d'identifier le besoin d'aller plus loin dans les interactions avec la recherche. En effet, la problématique des contaminants étant complexe, il faut accompagner ces derniers dans la compréhension des résultats et la transmission vers les apprenants.

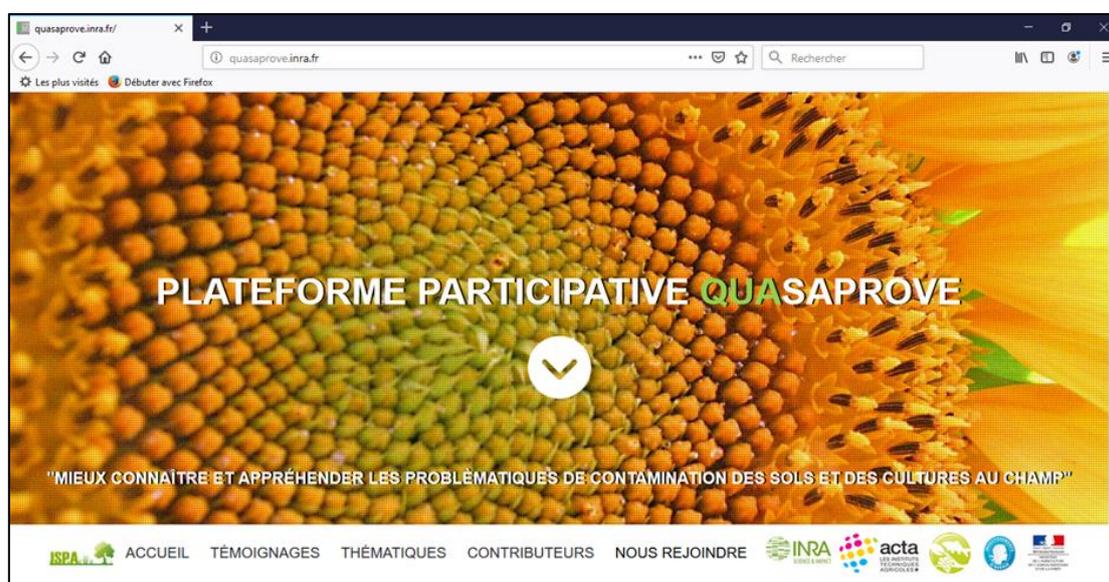


Figure 11 : Ecran d'accueil de la plateforme participative Quasaprove

3.1 Partie publique

Une première partie est publique et accessible à tous. Elle présente le réseau Quasaprove et met à disposition des fiches de synthèse sur les différents contaminants étudiés dans le projet ainsi que la réglementation s'y rattachant. Cette partie permet aussi de contacter les gestionnaires du réseau et de s'inscrire pour participer à la plateforme.

Par ailleurs, les données moyennes du réseau sur la période 2010 à aujourd'hui sont également accessibles librement via le site Internet du RMT Quasaprove (www.quasaprove.org).

3.2 Partie réservée aux contributeurs

Une seconde partie est accessible uniquement aux contributeurs après identification grâce à un login personnel et mot de passe. Elle contient :

- Une interface avec la base de données, permettant d'extraire les données pour lesquelles la personne connectée a des droits et la synthèse des données du réseau (minimum, maximum, moyenne, médiane des valeurs),
- Une interface pour remplir en ligne l'enquête annuelle sur les pratiques,
- Des cours, TP et TD téléchargeables pour les enseignants de lycées agricoles.

Trois supports de cours ont été créés sur les éléments-traces, les pesticides et les mycotoxines. Chaque support de cours comprend un diaporama sous format pdf, de 50 à 70 diapositives selon les sujets, associé à un fichier de commentaires, décrivant chaque diapositive. La plateforme comprend également des TP (prélèvement de sol et de végétaux, mesure de la densité apparente) et TD (interprétation des données d'analyse, calcul des stocks d'ETM, calcul des flux à la parcelle).

Une vidéo de présentation de la plateforme a été réalisée afin de diffuser l'information autour de la plateforme et du réseau : <http://quasaprove.inra.fr/Files/Video/VideoPresentation.mp4>.

Conclusion

Cette approche à l'échelle nationale nous a permis d'avoir une image des contaminations en éléments-traces, qui doit être encore complétée. Mais, elle ne nous a pas permis de trouver des relations statistiques prédictives des niveaux de contamination dans les végétaux.

En parallèle de cette étude, une thèse sur le cadmium et le blé dur, co-pilotée par ARVALIS-Institut du Végétal et l'INRA a conduit, en utilisant le réseau Quasaprove complété par d'autres réseaux de parcelles, de mettre en évidence des relations statistiques prédictives, incluant des indicateurs de disponibilité du métal dans le sol (Viala, 2018). L'utilisation de ces mêmes paramètres est une voie à tester pour trouver des relations pour le tournesol et le blé tendre.

Le projet Quasagro a permis de caractériser les niveaux de pesticides dans les sols de grandes cultures et d'évaluer l'effet des itinéraires techniques sur les niveaux de résidus.

L'application répétée de certains pesticides constitue une pression de sélection induisant l'adaptation de microorganismes du sol, favorisant la biodégradation microbienne de ces mêmes pesticides. Du point de vue agronomique, ces capacités de biodégradation accélérée sont susceptibles, dans certains cas, de diminuer l'efficacité du traitement phytosanitaire. Du point de vue environnemental, elle est en général intéressante parce qu'elle réduit la persistance du produit phytosanitaire dans le sol, limitant ainsi son transfert vers les eaux.

Le manque de données actuel sur les pesticides rémanents dans les systèmes de culture (biologiques ou conventionnels) est emblématique du manque de recul et de connaissances des sources potentielles de contamination des productions agricoles et de l'environnement. En cela, les données obtenues sur les niveaux de pesticides constituent un des points forts du projet. Dans l'ensemble, ces résultats soulignent la nécessité de développer des stratégies pour réduire les niveaux de pesticides dans les sols agricoles, ainsi que pour la surveillance plus systématique des résidus de pesticides dans ce compartiment.

Les résultats du projet Quasagro ont été présentés lors des 8^{èmes} Rencontres du RMT Quasaprove, le 26 septembre 2018, à Bordeaux Sciences Agro. Les vidéos sont disponibles sur le site Internet du RMT Quasaprove¹.

Remerciements

L'équipe-projet remercie tout particulièrement les enseignants et chefs d'exploitation des établissements d'enseignement technique agricole qui ont contribué à la collecte des données au sein du réseau de parcelles Quasaprove et ceux qui ont accepté de collaborer à la création de la plateforme participative.

¹ <http://www.quasaprove.org/moodle/course/view.php?id=124>

Références bibliographiques

- Baize D., Tomassone R., 2003. Modélisation empirique du transfert du cadmium et du zinc des sols vers les grains de blé tendre. *Etude et Gestion des sols*, v10 (4) 219-239.
- Barrier-Guillot B., Pierre J.B., Denaix L., 2012. Eléments traces métalliques – Les teneurs en cadmium des céréales difficiles à maîtriser. *Perspectives agricoles* n° 391 p. 25-28.
- Cruz J., 2015. Étude de la contamination par les pesticides des milieux eau, air et sols. Développement de nouveaux outils et application à l'estuaire de la Gironde. Thèse de Doctorat, Chimie analytique. Université de Bordeaux.
- Dauguet S., Lacoste F., 2013. Les enseignements de 7 années de plan de surveillance des oléagineux. *OCL* 20(2) : 119-123.
- Donnat E., Forget F., Barbaste M., Dauguet S., Faucher S., Gavaland Gourdain E., Méléard B., Denaix L., 2016. Etude de la multicontamination des productions végétales de grande culture en conditions de plein champ. *Innovations Agronomiques* 49, 247-266. Disponible sur <https://www6.inra.fr/ciag/content/download/5839/43894/file/Vol49-18-Donnat.pdf>
- Fernandes V.C., Domingues V.F., Mateus N., Delerue-Matos C., 2012. Pesticide residues in Portuguese strawberries grown in 2009–2010 using integrated pest management and organic farming. *Environmental Science and Pollution Research*, 19 (9), 4184-4192.
- Gourdain E., Piraux F., Barrier-Guillot B., 2009. Les outils pour gérer le risque déoxynivalénol sur blé tendre et blé dur. AFPP – 9ème Conférence Internationale sur les Maladies des Plantes, Tours, 8 et 9 décembre 2009.
- Grant C.A., et al., 1998. Cadmium accumulation in crops. *Canadian Journal of Plant Science* 78(1), 1-17.
- Grant C.A., et al., 2010. Preceding crop and phosphorus fertilization affect cadmium and zinc concentration of flaxseed under conventional and reduced tillage. *Plant and Soil* 333(1-2), 337-350.
- Landschoot S., Audenaert K., Waegeman W., Pycke B., Bekaert B., Baets B.D., Haesaert G., 2011. Connection between primary *Fusarium* inoculum on gramineous weeds, crop residues and soil samples and the final population on wheat ears in Flanders. *Belgium Crop Protection*, 30, 1297-1305.
- Leblanc J.C., 2001. Etude de l'alimentation française totale 2. Anses.
- McLaughlin M.J., Singh B.R., 1999. Cadmium in Soils and Plants, *Developments in Plant and Soil Sciences* Volume 85, 1-9.
- Naef A., Defago G., 2006. Population structure of plant-pathogenic *Fusarium* species in overwintered stalk residues from Bt-transformed and non-transformed maize crops. *European Journal of Plant Pathology*, 116, 129-143.
- Obst A., Bechtel A., 2000. Conditions climatiques favorisant l'attaque des épis de blé par *Fusarium graminearum*. In Réunion Club Fusariose, Bayer Agro.
- Perrin-Garnier C., Schiavon F., Morel J.L., Scheunert M., 2001. Effect of sludge-amendment or nutrient addition on the biodegradation of the herbicide isoproturon in soil. *Chemosphere* 44, 887–892.
- Puglisi E., Del Re A.A.M., Rao M.A., Gianfreda L., 2006. Development and validation of numerical indices integrating enzyme activities of soils. *Soil Biology and Biochemistry* 38, 1673-1681.
- Sauvé S., Hendershot W., Herbert E.A., 2000. Solid-solution partitioning of metals in contaminated soils: Dependence on pH, total metal burden, and organic matter. *Environmental Science & Technology*, 34 (7), 1125-1131.
- Sauvé S., Mc Bride M., Hendershot W., 1998. Soil solution speciation of lead: effects of organic matter and pH. *Soil Science Society of America Journal*, 62, 618-621.
- Schaafsma A.W., Tamburic-Ilinic L., Miller J.D., Hooker D.C., 2001. Agronomic considerations for reducing deoxynivalenol in wheat grain. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 23, 279-285.
- Stephan C.H., Courchesne F., Hendershot W.H., McGrath S.P., Chaudri A.M., Sappin-Didier V., Sauve S., 2008. Speciation of zinc in contaminated soils. *Environmental Pollution*, 155 (2) 208-216.

Viala Y., 2018. Elaboration d'un modèle de prédiction de la phytodisponibilité du cadmium dans les sols agricoles : application à la contamination cadmiée du blé dur. Thèse de Doctorat, Biodiversité et Ecologie. Université de Bordeaux.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « Innovations Agronomiques », la date de sa publication, et son URL ou DOI).