

Exposition au cadmium

Propositions de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes et supports de culture permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles et la contamination des productions végétales

Question n°3

Saisine 2015-SA-0140

RAPPORT d'expertise collective

**Comité d'experts spécialisé « Evaluation des risques physico-chimiques liés aux
aliments »**

2018

Mots clés

Cadmium, matières fertilisantes, sol, culture, consommateur

Key words

Cadmium, fertilising products, soils, plants, consumer

Présentation des intervenants

PRÉAMBULE : Les experts membres de comités d'experts spécialisés, de groupes de travail ou désignés rapporteurs sont tous nommés à titre personnel, *intuitu personae*, et ne représentent pas leur organisme d'appartenance.

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis par les comités scientifiques suivants :

COMITÉ D'EXPERTS SPÉCIALISÉ

▪ CES « Valeurs sanitaires de référence » - 17 octobre 2017, 22 juin 2018

Président

M. Fabrice MICHIELS – Médecin du travail / toxicologue à l'Association Interentreprises pour la Santé au Travail en Corrèze

Membres

M. Marc BARIL – Professeur associé à l'Université de Montréal – Compétences : Chimiste toxicologue, hygiène industrielle

M. Stéphane BINET – Pharmacien toxicologue à la direction scientifique à l'INRS – Compétences : toxicologie générale et industrielle

Mme Michèle BISSON – Responsable d'étude à l'INERIS – Compétences : Pharmacien toxicologue, toxicologie générale

Mme Anne CHEVALIER – Epidémiologiste retraitée de l'Institut de Veille Sanitaire -Compétences : épidémiologie

Mme Fatiha EL-GHISSASSI – Scientifique, Section des Monographies de CIRC (IMO) Centre International de Recherche sur le Cancer - Compétences : Docteur es science en biochimie spécialiste en cancérogénèse et génotoxicité

Mme Mounia EL-YAMANI – Responsable d'unité à Santé publique France (anciennement Institut de Veille sanitaire) – Compétences : Docteur es science en biochimie, toxicologie

M. Claude EMOND – Professeur adjoint de clinique à l'Université de Montréal – Compétences : Toxicologie, modèle PBPK, toxicocinétique, nanotoxicologie, perturbateurs endocriniens

M. Reginald Edward FITZGERALD – Expert en toxicologie réglementaire au Centre Suisse de Toxicologie Humaine Appliquée - Compétences : toxicologie de la reproduction, neurotoxicité du développement, évaluation des risques humains

M. Robert GARNIER – Médecin toxicologue, Centre antipoison de Paris - Compétences : Toxicologie médicale – Médecine du travail

Mme Perrine HOET – Professeur à l'Université Catholique de Louvain – Compétences : médecine, toxicologie industrielle

Mme Yuriko IWATSUBO – Médecin épidémiologiste à Santé publique France (anciennement Institut de Veille sanitaire) – Compétences : épidémiologie des risques professionnels

Mme Cécile KAIRO – Évaluateur de risques sanitaires - (anciennement Institut de Veille sanitaire)
Compétences : Docteur en pharmacie spécialisé en environnement, toxicologie générale et évaluation des risques

Mme Laila LAKHAL – Ingénieur INRA unité Toxalim - Compétences : Toxicologie, métabolisme, perturbateurs endocriniens

M. Frédéric LIRUSSI – Maître de Conférences des Universités– Praticien Hospitalier (MCU-PH) à l'UFR des Sciences de Santé & CHU de Dijon - Compétences : Toxicologie Clinique, Toxicologie analytique, Immunité Innée, Reprotoxicité

Mme Anne MAITRE – Professeur des Universités – Praticien Hospitalier (PU-PH) au Laboratoire de Toxicologie Professionnelle et Environnementale, CHU de Grenoble ; Responsable de l'équipe « Environnement et prédiction de la santé des populations », Laboratoire TIMC, Université Grenoble Alpes – Compétences : médecine, toxicologie, IBE, métrologie des polluants, hygiène industrielle

Mme Florence PILLIERE – Conseiller médical en toxicologie à l'INRS – Compétences : médecine du travail, toxicologie, IBE

Mme Anne PLATEL – Maître de conférences à la Faculté des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques de Lille – Laboratoire de Toxicologie Génétique, Institut Pasteur de Lille - Compétences : Toxicologie, Génotoxicité, QSAR

M. Henri SCHROEDER – Enseignant chercheur à l'URAFPA, INRA USC 340, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Lorraine - Pharmacien biologiste - Compétences : Neurotoxicité, comportement animal, développement cérébral, exposition périnatale

M. Olivier SORG – Chef de groupe de recherche à l'Université de Genève - Compétences : Docteur es science en biochimie, toxicologie expérimentale, dermatotoxicologie

M. Jérôme THIREAU – Chargé de recherche au CNRS - Compétences : Docteur es science, physiologie animale, biologie cellulaire, cardiotoxicité

M. Claude VIAU – Professeur associé à l'université de Montréal – Compétences : Toxicologie, IBE, hygiène industrielle, métrologie des polluants

M. Raymond VINCENT - Retraité (anciennement Chargé de mission à la Direction Déléguée aux Applications (INRS)) - Compétences : chimie, métrologie des polluants, évaluation des risques professionnels

■ CES « Caractérisation des dangers des substances et valeurs toxicologiques de référence » - 09 décembre 2016, 23 juin 2017

Président

M. Michel GUERBET – Professeur de toxicologie à l'UFR médecine pharmacie de Rouen - Pharmacien toxicologue

Vice-président

M. Dominique LAFON – Médecin toxicologue chez Nexter Group – Médecine du travail, toxicologie, reprotoxicité

Membres

M. Marc BARIL - Professeur associé à l'Université de Montréal – Chimiste toxicologue, VLEP

M. Sylvain BILLET – Enseignant chercheur / maître de conférence en toxicologie à l'Université du Littoral Côte d'Opale – Toxicologie respiratoire, nanomatériaux

Mme Michèle BISSON – Responsable d'étude à l'INERIS – Pharmacien toxicologue, toxicologie générale - VTR

Mme Anne CHEVALIER – Epidémiologiste retraitée de l'Institut de Veille Sanitaire

M. François CLINARD – Epidémiologiste à l'Institut de Veille Sanitaire – Pharmacien toxicologue, épidémiologie, évaluation des risques sanitaires

Mme Fatiha EL-GHISSASSI – Scientifique, Section des Monographies de IARC (IMO) Centre International de Recherche sur le Cancer - Docteur es science en biochimie spécialiste en cancérogénèse et génotoxicité

Mme Mounia EL-YAMANI – Responsable d'unité à l'Institut de Veille sanitaire – Docteur es science en biochimie, toxicologie, VLEP

M. Claude EMOND – Professeur adjoint de clinique à l'Université de Montréal – Toxicologie, modèle PBPK, toxicocinétique, nanotoxicologie, perturbateurs endocriniens

M. Guillaume GARCON – Professeur de toxicologie à l'Université de Lille 2 – Toxicologie générale, cancérologie, modèles expérimentaux, toxicologie respiratoire, pollution atmosphérique

M. Ludovic LE HEGARAT – Chef d'unité adjoint Toxicologie des contaminants - Anses – Laboratoire de Fougères- Toxicologie, génotoxicité, nanomatériaux

Mme Véronique MALARD – Ingénieur chercheur en toxicologie au CEA, Centre de Cadarache. Docteur es science – Toxicologie « in vitro », biologie cellulaire, nanotoxicologie, protéomique.

M. Fabrice MICHIELS – Médecin du travail / toxicologue à l'Association Interentreprises pour la Santé au Travail 19

M. Jean-Paul PAYAN – Chef du laboratoire Pénétration Cutanée, Cinétique et Métabolisme à l'INRS, Nancy – Pharmacien toxicologue, toxicocinétique

M. Henri SCHROEDER – Enseignant chercheur à l'URAFPA, INRA USC 340, Faculté des Sciences et Technologies, Université de Lorraine - Pharmacien biologiste - Neurotoxicité, comportement animal, développement cérébral, exposition périnatale

M. Alain SIMONNARD – Chef de département à l'INRS, Nancy - Pharmacien toxicologue, toxicologie générale et reprotoxicité, anatomopathologie

M. Olivier SORG – Chef de groupe de recherche à l'Université de Genève – Docteur es science en biochimie, toxicologie expérimentale, dermatotoxicologie

Mme Lydie SPARFEL – Professeur à l'Université de Rennes 1 / IRSET 'Institut de Recherche en Santé, Environnement et Travail' UMR INSERM 1085– Pharmacien Toxicologue, immunotoxicologie, toxicogénomique, cancérologie, biologie cellulaire et moléculaire

M. Jérôme THIREAU – Chargé de recherche au CNRS – Docteur es science, physiologie animale, biologie cellulaire, cardiotoxicité

■ **CES « Evaluation des risques physico-chimiques liés aux aliments » - 20 octobre 2015, 14 septembre 2016, 12 octobre 2016, 11 mai 2017, 14 juin 2017, 18 octobre 2017, 13 décembre 2017, 15 mars 2018, 23 mai 2018, 20 juin 2018**

Président

M. Cyril FEIDT – Professeur des universités – compétences en transfert des contaminants

Membres

M. Claude ATGIE – Professeur des universités – compétences en toxicologie

M. Pierre-Marie BADOT - Professeur des universités – compétences en transfert des contaminants

M. Jacques BELEGAUD – Professeur honoraire– compétences en toxicologie

Mme Valérie CAMEL- Professeur des universités – compétences en chimie analytique

Mme Martine CLAUW- Professeur des universités- compétences en toxicologie

M. Guillaume DUFLOS- Responsable de laboratoire- compétences en chimie analytique

Mme Camille DUMAT- Professeure des universités – compétences en agronomie, biogéochimie et risque, Toulouse INP et CERTOP-Axe Transition Ecologique.

M. Jérôme GAY-QUEHEILLARD- Maître de conférence des universités- compétences en impacts digestifs et métabolisme

M. Thierry GUERIN – Directeur de recherche – compétences en chimie analytique

Mme Nicole HAGEN-PICARD- Professeur des universités- compétences en toxicologie

Mme Laila LAKHAL- Ingénieur animateur de projets - compétences en toxicologie

M. Claude LAMBRE- Retraité- compétences en toxicologie

M. Bruno LE BIZEC- Professeur des universités- compétences en chimie analytique

Mme Raphaële LE GARREC- Maître de conférence des universités- compétences en toxicologie

M. Eric MARCHIONI- Professeur des universités- compétences en chimie analytique

M. César MATTEI- Maître de conférence des universités- compétences en toxicologie

Mme Sakina MHAOUTY-KODJA- Directeur de recherche- compétences en toxicologie

M. Fabrice NESSLANY-Directeur de laboratoire- compétences en toxicologie

M. Alain-Claude ROUDOT- Professeur des universités - compétences en modélisation mathématique

Mme Karine TACK- Responsable de laboratoire- compétences en chimie analytique

Mme Paule VASSEUR- Professeur émérite- compétences en toxicologie

M. Eric VERDON- Responsable de laboratoire - compétences en chimie analytique

M. Jean-Paul VERNOUX- Professeur émérite-compétences en toxicologie

CES « Matières fertilisantes et supports de culture » - 07 septembre 2016, 02 mai 2018

Président

Mme Monique LINERES – Ingénieure de recherche retraitée de l'INRA, Institut National de la Recherche Agronomique - Docteur es sciences de la terre

Membres

M. Fabrice BELINE – Directeur de recherche à l'Irstea, Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture – Docteur es agrochimie

M. Antonio BISPO – Ingénieur chercheur en protection des sols à l'ADEME, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie - Docteur es science en écotoxicologie et en sciences agronomiques

Mme Marie-Chantal CANIVENC-LAVIER - Chargée de recherche à l'INRA, Institut National de la Recherche Agronomique – compétences en agrochimie, physiologie végétale, sciences des aliments

Mme Isabelle DEPORTES - Ingénieur chercheur en santé et gestion des déchets à l'ADEME, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie - Docteur es science en sciences de la vie et de la santé

Mr Abraham ESCOBAR GUTIERREZ - Chargé de recherche à l'INRA, Institut National de la Recherche Agronomique – compétences en écophysiologie végétale, agronomie

Mr François LAURENT - Chargé de recherche à l'INRA, Institut National de la Recherche Agronomique – Docteur es sciences pharmaceutiques

Mme Monique LINERES – Ingénieure de recherche retraitée de l'INRA, Institut National de la Recherche Agronomique – Docteur es sciences de la terre

M. Pascal PANDARD – Responsable de l'unité Expertise et essais en écotoxicologie de l'INERIS, Institut National de l'Environnement Industriel et des RISques – Docteur es toxicologie de l'environnement

M. Yves PRIN – Chercheur au CIRAD, Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement – compétences en microbiologie

Mme Isabelle QUILLERE – Ingénieure de recherche de l'INRA, Institut National de la Recherche Agronomique – compétences en agronomie, physiologie végétale, nutrition minérale

RAPPORTEURS

M. Pierre-Marie BADOT - Professeur des universités – compétences en transfert des contaminants

M. Antonio BISPO – Directeur de l'unité INFOSOL à l'Institut National de Recherche Agronomique INRA - Docteur es science en écotoxicologie et en sciences agronomiques

Mme Isabelle DEPORTES - Ingénieur chercheur en santé et gestion des déchets à l'ADEME, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie - Docteur es science en sciences de la vie et de la santé

Mme Camille DUMAT- Professeure des universités – compétences en agronomie, biogéochimie et risque, Toulouse INP et CERTOP-Axe Transition Ecologique.

PARTICIPATION ANSES

Coordination et contribution scientifique

Mme Géraldine CARNE – Chargée de projets scientifiques – Anses

M. Stéphane LECONTE – Chef de projets scientifiques – Anses

Contribution scientifique

M. Nicolas BREYSSE – Evalueur scientifique et technique - Anses

Mme Amélie CREPET - Chef de projets scientifiques – Anses

M. Gilles RIVIERE – Adjoint au chef de l'Unité évaluation des risques liés aux aliments

Mme Véronique SIROT - Chef de projets scientifiques - Anses

Secrétariat administratif

Mme Séverine BOIX-PETRE – Anses

Mme Angélique LAURENT – Anses

Mme Catherine FRANCOIS - Anses

Les travaux, objets du présent rapport ont été suivis et adoptés par le CES suivant :

CES « Evaluation des risques physico-chimiques liés aux aliments » - 20 juin 2018

Président

M. Cyril FEIDT – Professeur des universités – compétences en transfert des contaminants

Membres

M. Claude ATGIE – Professeur des universités – compétences en toxicologie

M. Pierre-Marie BADOT - Professeur des universités – compétences en transfert des contaminants

M. Jacques BELEGAUD – Professeur honoraire– compétences en toxicologie

Mme Valérie CAMEL- Professeur des universités – compétences en chimie analytique

Mme Martine CLAUW- Professeur des universités- compétences en toxicologie

M. Guillaume DUFLOS- Responsable de laboratoire- compétences en chimie analytique

Mme Camille DUMAT- Professeur des universités – compétences en agronomie, biogéochimie et risque, INPT et CERTOP-Axe Transition Ecologique.

M. Jérôme GAY-QUEHEILLARD- Maître de conférence des universités- compétences en impacts digestifs et métabolisme

M. Thierry GUERIN – Directeur de recherche – compétences en chimie analytique

Mme Nicole HAGEN-PICARD- Professeur des universités- compétences en toxicologie

Mme Laila LAKHAL- Ingénieur animateur de projets - compétences en toxicologie

M. Claude LAMBRE- Retraité- compétences en toxicologie

M. Bruno LE BIZEC- Professeur des universités- compétences en chimie analytique

Mme Raphaële LE GARREC- Maître de conférence des universités- compétences en toxicologie

M. Eric MARCHIONI- Professeur des universités- compétences en chimie analytique

M. César MATTEI- Maître de conférence des universités- compétences en toxicologie

Mme Sakina MHAOUTY-KODJA- Directeur de recherche- compétences en toxicologie

M. Fabrice NESSLANY-Directeur de laboratoire- compétences en toxicologie

M. Alain-Claude ROUDOT- Professeur des universités - compétences en modélisation mathématique

Mme Karine TACK- Responsable de laboratoire- compétences en chimie analytique

Mme Paule VASSEUR- Professeur émérite- compétences en toxicologie

M. Eric VERDON- Responsable de laboratoire - compétences en chimie analytique

M. Jean-Paul VERNOUX- Professeur émérite-compétences en toxicologie

AUDITION DE PERSONNALITÉS EXTÉRIEURES

Mme Laurence DENAIX – Directrice d'unité UMR Interactions Sol Plante Atmosphère de l'INRA, Institut National de la Recherche Bordeaux Sciences Agro, auditionnée le 25 janvier 2017

M. Pascal DENOROY – Ingénieur de recherche de l'INRA, Institut National de la Recherche Bordeaux Sciences Agro, et Vice-président du bureau du COMIFER, Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée, auditionné le 23 février 2017

Mme Monique LINERES – Ingénieure de recherche retraitée de l'INRA, Institut National de la Recherche Agronomique - Docteur es sciences de la terre, auditionnée le 25 janvier 2017

SOMMAIRE

Présentation des intervenants	3
Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions	13
Sigles et abréviations	52
Liste des tableaux.....	53
Liste des figures	55
1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise.....	58
1.1 Contexte.....	58
1.2 Objet de la saisine.....	58
1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation.....	59
1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts.	59
2 Analyses et conclusions.....	61
2.1 Préambule.....	61
2.2 Le cadmium : un contaminant de l'environnement et de la chaîne alimentaire.....	62
2.3 Les matières fertilisantes	64
2.3.1 Définition et réglementation	64
2.3.1.1 Définition	64
2.3.1.2 Réglementation	65
2.3.2 Les engrais phosphatés minéraux commercialisés : source importante d'apport en cadmium	68
2.3.2.1 Origine du cadmium dans les engrais minéraux.....	68
2.3.2.2 Procédés de fabrication des engrais	70
2.3.2.3 Teneurs en cadmium dans les engrais.....	71
2.3.3 Apport en cadmium <i>via</i> les autres matières fertilisantes hors engrais minéraux phosphatés commercialisés	73
2.3.4 Bilan des apports en cadmium par les matières fertilisantes sur les sols agricoles français	75
2.3.5 Les limites en cadmium dans les matières fertilisantes.....	76
2.4 La fertilisation phosphatée des cultures	77
2.4.1 Les besoins des plantes en phosphore	77
2.4.2 La disponibilité en phosphore dans les sols	78
2.4.3 Les quantités d'engrais apportées aux sols.....	80
2.5 Les enjeux liés à la proposition d'un seuil en cadmium dans les MFSC permettant de maîtriser la pollution en cadmium des sols agricoles, la contamination des productions agricoles et l'exposition du consommateur.....	82
2.6 Analyse critique des travaux européens sur les valeurs limites en cadmium dans les fertilisants	83
2.6.1 Rapport de Smolders et Six (2013) « Revisiting and updating the effect of phosphate fertilizers to cadmium accumulation in European agricultural soils ».....	84
2.6.2 Rapport du Scientific Committee on Health and Environmental Risks, SCHER (2016) « Final Opinion on new conclusion regarding future trends of cadmium accumulation in EU arable soils » ...	86
2.6.3 Rapport de l'agence suédoise des produits chimiques (KEMI) (2011). « Kadmiumhalten måste minska– för folkhälsans skull En riskbedömning av kadmium med mineralgödsel i fokusRapport från ett regeringsuppdrag.2011 »	87
2.6.4 Bilan	88

2.7 Etat de l'art du transfert du cadmium depuis les apports dans les sols agricoles jusqu'à l'exposition du consommateur en vue de la proposition de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes	89
2.7.1 Schéma conceptuel	89
2.7.2 Etat de l'art : fonds géochimique, apports en cadmium par les différentes sources, transferts du cadmium vers les eaux, les végétaux et les animaux, et exposition humaine	91
2.7.2.1 Fond pédo-géochimique et teneurs habituelles.....	91
2.7.2.2 Le pH des sols : un paramètre clé pour prévoir la disponibilité du phosphore mais également celle du cadmium.....	94
2.7.2.3 Apport en cadmium dans les sols par les matières fertilisantes et pratiques agricoles	95
2.7.2.4 Apport en cadmium dans les sols par les dépôts atmosphériques.....	96
2.7.2.5 Apport en cadmium dans les sols par les eaux d'irrigation.....	97
2.7.2.6 Transfert du cadmium du sol <i>via</i> la lixiviation	99
2.7.2.7 Transfert du cadmium du sol vers la plante : notion de phytodisponibilité.....	101
2.7.2.7.1 <i>Principe</i>	101
2.7.2.7.2 <i>Mobilité du cadmium</i>	101
2.7.2.7.3 <i>Phytodisponibilité du cadmium</i>	103
2.7.2.7.4 <i>Phytotoxicité du cadmium</i>	104
2.7.2.7.5 <i>Exposition de la plante au cadmium par voie foliaire</i>	104
2.7.2.7.6 <i>Bilan</i>	105
2.7.2.8 Transfert du cadmium du sol vers les animaux	105
2.7.2.9 Exposition du consommateur au cadmium.....	105
2.8 Construction d'un modèle de transfert du cadmium en vue de l'évaluation de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de réduire la pollution des sols agricoles, la contamination des cultures et l'exposition du consommateur	108
2.8.1 Modélisation.....	109
2.8.2 Modélisation du transfert du cadmium depuis son apport dans les sols agricoles jusqu'à la culture : construction du modèle mathématique sur la base d'une approche bilan de masse (« mass-balance »)	110
2.8.2.1 Principe	110
2.8.2.2 Flux entrant en cadmium dans le sol agricole	118
2.8.2.3 Flux sortant en cadmium du sol agricole	120
2.8.2.4 Simulation des concentrations au cours du temps	121
2.8.3 Modélisation de l'exposition du consommateur : actualisation du modèle de l'Anses (saisine 2011-SA-0194).....	122
2.8.3.1 Principe	122
2.8.3.2 Données et calcul de l'exposition	122
2.8.3.3 Conséquences de la modification des teneurs en cadmium dans les aliments à base de blé et pommes de terre.....	123
2.8.3.3.1 <i>Aliments à base de blé</i>	123
2.8.3.3.2 <i>Pomme de terre</i>	126
2.9 Résultats de la modélisation	127
2.9.1 Principe	127
2.9.2 Vérification de la pertinence du modèle mathématique.....	129
2.9.3 Etude de l'évolution de la contamination en cadmium des sols pour les différents itinéraires de fertilisation en fonction des apports d'engrais minéraux phosphatés et de leurs teneurs en cadmium.....	130
2.9.4 Etude de l'évolution de la contamination en cadmium des cultures pour les différents itinéraires de fertilisation en fonction des apports d'engrais minéraux phosphatés et de leurs teneurs en cadmium.....	135
2.9.5 Etude de l'évolution du cadmium lixivié pour les différents itinéraires de fertilisation en fonction des apports d'engrais minéraux phosphatés et de leurs teneurs en cadmium	139
2.9.6 Etude de l'évolution modélisée de l'exposition du consommateur suite à une action à la source sur les teneurs en cadmium des engrais minéraux phosphatés apportés au sol.....	144
2.9.7 Etude de flux de cadmium apportés par les matières fertilisantes	152

2.10 Proposition de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de maîtriser la contamination en cadmium des sols, des productions végétales et l'exposition du consommateur.....	158
2.10.1 Propositions de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes au regard du risque sanitaire.....	158
2.10.2 Propositions de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes au regard des caractéristiques des sols récepteurs des intrants agricoles	160
2.10.3 Bilan.....	162
2.11 Traitement des incertitudes.....	164
2.11.1 Sources d'incertitudes liées au corpus de connaissance.....	164
2.11.1.1 Incertitudes prises en compte dans le processus d'évaluation.....	164
2.11.1.2 Incertitudes non prises en compte dans le processus d'évaluation.....	165
2.11.2 Sources d'incertitudes liées à la méthode d'évaluation	167
2.11.2.1 Incertitudes prises en compte dans le processus d'évaluation.....	167
2.11.2.2 Incertitudes non prises en compte dans le processus d'évaluation.....	167
2.11.3 Sources d'incertitudes liées à la communication des résultats.....	170
2.11.3.1 Difficultés de respecter les flux pour les amendements organiques.....	170
2.11.3.2 Difficultés de diminuer les niveaux de contamination des aliments et l'exposition alimentaire associée.....	170
2.12 . Recommandations et perspectives.....	171
3 Conclusions	173
4 Bibliographie.....	177
ANNEXES	187

Expertise collective : synthèse de l'argumentaire et conclusions



EXPERTISE COLLECTIVE : SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS

Relatif à « l'exposition au cadmium – question 3 : propositions de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles et la contamination des productions végétales »

Ce document synthétise les travaux du comité d'experts spécialisé « Evaluation des risques physico-chimiques liés aux aliments ».

Présentation de la question posée

L'Anses a été saisie le 22 juin 2015 par la Direction générale de la santé (DGS), la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF), la Direction générale du travail (DGT), la Direction générale de l'alimentation (DGAJ) et la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) sur la problématique suivante :

Exposition au cadmium – Propositions de valeurs toxicologiques de référence (VTR) par ingestion, de valeurs sanitaires repères dans les milieux biologiques (sang, urine, ...) et de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes et supports de culture permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles et la contamination des productions végétales.

Contexte scientifique

Le cadmium (Cd) est un élément trace métallique ubiquitaire présent dans les différents compartiments de l'environnement (sols, eau et air) du fait de sa présence à l'état naturel dans la croûte terrestre et des apports anthropiques liés aux activités industrielles et aux pratiques agricoles. Le cadmium dans le sol peut exister sous forme soluble dans l'eau du sol et sous forme de complexes insolubles avec des constituants inorganiques et organiques du sol. Le cadmium dans le sol tend à être plus disponible lorsque le pH du sol est bas. Le cadmium soluble pénètre ainsi facilement dans les végétaux par leurs racines. Le cadmium est également parfois adsorbé par les végétaux par leurs parties aériennes (cette voie peut en particulier être significative pour certains végétaux tels que les salades qui développent des surfaces foliaires importantes et dans le cas de certaines zones urbaines et industrielles caractérisées par de fortes densités en particules fines). Le cadmium entre ainsi dans la chaîne alimentaire (Efsa, 2009).

Le cadmium est un contaminant préoccupant pour l'Homme. Le cadmium se caractérise par un comportement bioaccumulable. La population générale y est exposée principalement par la voie alimentaire, hors tabagisme (Efsa, 2009, 2012). Chez l'Homme, le cadmium est largement distribué dans l'organisme, dans lequel il s'accumule avec le temps. La demi-vie d'élimination biologique est comprise entre 10 et 30 ans (12 ans en moyenne). Le cadmium est

principalement présent dans le foie et les reins (ATSDR, 2012). Une exposition prolongée par voie orale au cadmium induit, chez l'Homme, une néphropathie, des pathologies osseuses, des troubles de la reproduction ainsi qu'un risque accru de cancer de plusieurs organes (poumon, prostate et rein) ayant donné lieu à un classement « cancérigène pour l'Homme » (groupe 1) pour le cadmium et ses composés par le Centre International de Recherche sur le Cancer en 2012 (IARC, 2012) et dans la catégorie 2¹ par l'Union européenne en 2004 (JOCE, 2004).

Selon l'avis et le rapport de l'Anses relatifs à la deuxième étude de l'alimentation totale (EAT) publiés en juin 2011 (Anses, 2011a), l'exposition alimentaire des personnes en France au cadmium apparaît en augmentation par rapport à la précédente étude de l'alimentation totale parue en 2004. Un dépassement de la valeur toxicologique de référence (VTR) définie par l'Efsa en 2009 est constaté chez 0,6% des adultes et 15% des enfants. Suite à cette deuxième EAT, l'Anses a émis un avis relatif à la révision des teneurs maximales en cadmium des denrées alimentaires destinées à l'Homme (Anses, 2011b). Celui-ci recommande, afin de réduire l'exposition de la population, d'agir sur le niveau de contamination des sources environnementales, en particulier au niveau des intrants (engrais minéraux notamment phosphatés, fertilisants et amendements organiques...) à l'origine en partie de la contamination des sols et des aliments.

L'Anses est interrogée pour se prononcer sur les questions suivantes :

1. Pour les populations riveraines de sites pollués susceptibles d'être surexposées au cadmium :
 - a. Quelles valeurs toxicologiques de référence par ingestion (adultes, enfants...) faut-il retenir dans le cadre de la réalisation des évaluations quantitatives des risques sanitaires ?
 - b. Quelles valeurs sanitaires repères du cadmium faut-il retenir dans les milieux biologiques (sang, urines...), selon l'âge, dans le cadre d'une prise en charge sanitaire ?
2. Pour les populations de travailleurs en contact avec des matières fertilisantes, des produits ou procédés impliquant du cadmium, ou intervenant sur des sites pollués, et à la lumière des informations qui pourraient être obtenues dans le cadre de la saisine adressée à l'InVS (Institut National de Veille Sanitaire devenu depuis le 1^{er} mai 2016 l'Agence Nationale de Santé Publique) :
 - a. Les risques liés à l'exposition au cadmium dans ces contextes professionnels sont-ils bien évalués au titre des réglementations santé et sécurité au travail (à l'aide d'une enquête de filière par exemple) ?
 - b. Quels sont les niveaux de contamination qui pourraient être estimés selon les activités ou situations professionnelles ?
 - c. Quelles conclusions peuvent en être tirées en comparaison des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) et des valeurs limites biologiques (notamment celles recommandées par l'Anses) ?
3. Dans l'ensemble des matières fertilisantes et supports de culture (MFSC), quels seraient les niveaux en cadmium permettant, en prenant en compte les travaux européens et la spécificité de ces produits, de maîtriser la pollution des sols agricoles et la contamination des productions végétales ?

La présente synthèse traite de la troisième question concernant le cadmium et les MFSC.

Les matières fertilisantes représentent une source d'apport en cadmium dans les sols agricoles, constituant un des points d'entrées du cadmium dans la chaîne alimentaire. Les matières fertilisantes comprennent les engrais (organiques, minéraux, organo-minéraux) destinés à

¹ Correspondant à la catégorie 1B actuelle définie par le règlement (CE) N°1272/2008 : substance présumée cancérigène chez l'être humain

assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux et les amendements (organiques, minéraux, organo-minéraux) permettant d'améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Les engrais minéraux liés aux engrais phosphatés commercialisés sont identifiés comme étant la source majoritaire d'apport en cadmium dans les sols agricoles. Ils sont fabriqués à partir des roches naturelles phosphatées qui peuvent contenir du cadmium en concentrations importantes en fonction de la zone géographique d'extraction de la roche. La fertilisation phosphatée est raisonnée selon les besoins des plantes en phosphore et la disponibilité en phosphore des sols. Belon *et al.* (2012) ont montré que les apports en cadmium au sol en France dans le cadre des matières fertilisantes sont fortement liés aux engrais minéraux phosphatés dans les départements de grandes cultures. Cela s'explique par leur concentration en cet élément et par les quantités de matières fertilisantes utilisées en agriculture en France. Il est également observé que les effluents d'élevage contribuent significativement aux apports au sol dans les régions d'élevage (Bretagne par exemple). Le rapport ADEME-SOGREAH (2007) corrobore le fait que les engrais minéraux phosphatés constituent plus de la moitié des apports en cadmium au sol, alors que les déjections animales représentent 25% des apports en cadmium.

La volonté de maîtriser l'apport en cadmium provenant des matières fertilisantes n'est pas récente et se traduit dans la réglementation française par des critères d'innocuité définis pour les autorisations de mise sur le marché des MFSC et qui sont repris par des normes portant sur des MFSC particulières. Concernant les engrais inorganiques minéraux, ils sont définis au niveau européen par le règlement (CE) n°2003/2003² mais celui-ci ne fixe pas de limite en cadmium dans les engrais CE. Actuellement, la norme française NF U 42-001-1 fixe pour ces engrais minéraux une teneur maximale réglementaire en cadmium de 90 mg Cd.kg⁻¹ en masse d'équivalent d'anhydride phosphorique (P₂O₅). La Commission européenne souhaite réviser la réglementation relative aux matières fertilisantes avec pour objectif la fixation de nouvelles valeurs limites des contaminants dans l'ensemble des matières fertilisantes prenant en compte les effets adverses du cadmium pour l'Homme et l'environnement. Il est notamment envisagé dans le cas d'un engrais organo-minéral une teneur abaissée en cadmium de ce fertilisant porteur du marquage CE pour une teneur en phosphore (P) total égale ou supérieure à 5 % en masse d'équivalent anhydride phosphorique (P₂O₅) (« engrais phosphaté ») à la valeur de 60 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹, puis une réduction 3 ans après de ce seuil à 40 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ et finalement 12 ans après à 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹. Il est également proposé dans ce projet pour les amendements minéraux basiques et organiques porteurs du marquage CE, une valeur seuil en Cd de 3 mg.kg⁻¹ de matière sèche et pour les amendements inorganiques une valeur seuil en Cd de 1.5 mg.kg⁻¹ de matière sèche³. Lors des discussions inter-institutionnelles en cours, le Conseil de l'Europe propose une teneur en cadmium dans l'engrais organo-minéral porteur du marquage CE pour une teneur en phosphore (P) total égale ou supérieure à 5 % en masse d'équivalent anhydride phosphorique (P₂O₅) de 60 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹⁴.

Au regard, d'une part de l'intérêt agronomique de l'épandage sur les sols agricoles des matières fertilisantes et d'autre part, de l'identification de ces matières fertilisantes comme source de contamination environnementale et d'impact sanitaire par l'apport de cadmium dans la chaîne alimentaire, l'Anses est mandatée pour proposer des niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de réduire la pollution des sols agricoles et la contamination des productions végétales, et de facto l'exposition alimentaire du consommateur.

² Règlement (CE) n°2003/2003 du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003, modifié par le règlement (UE) n°463/2013 de la Commission du 17 mai 2013

³ European commission (2016). Limits for cadmium in phosphate fertilisers. Accompanying the document Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council laying down rules on the making available on the market of CE marked fertilizing products and amending.

⁴ Council of the European Union. (2017). Working document from Presidency to Working Party on Technical Harmonisation (Dangerous Substances - Fertilisers) - Compromise for cadmium limits in phosphate fertilisers

Organisation de l'expertise

L'Anses a confié au comité d'experts spécialisé (CES) « Evaluation des risques liés aux substances chimiques » (CES Substances) l'instruction de cette saisine jusqu'au 30 juin 2017, puis au CES « Valeurs sanitaires de référence » (CES VSR).

Des experts rapporteurs ont été nommés pour débattre spécifiquement sur chacune des trois questions de la saisine.

Les travaux d'expertise des rapporteurs ont été soumis régulièrement aux CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques).

Concernant la troisième question qui fait l'objet de cette synthèse, les travaux des experts nommés pour cette question ont fait l'objet de présentations entre septembre 2016 et juin 2018 devant les comités d'experts spécialisés (CES) « Evaluation des risques physico-chimiques liés aux aliments » (CES ERCA), « Matières Fertilisantes et Supports de Culture » (CES MFSC) et « Evaluation des risques liés aux substances chimiques » (CES Substances) jusqu'au 30 juin 2017 puis « Valeurs sanitaires de référence » (CES VSR). Les travaux liés à cette question ont fait l'objet d'une validation le 20 juin 2018 par le CES ERCA.

Le rapport produit par les rapporteurs tient compte des observations et éléments complémentaires transmis par les membres du CES.

Ces travaux sont issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires. Ils ont été réalisés dans le respect de la norme NF X 50-110 « qualité en expertise ».

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

Dans le cadre de la troisième question de cette saisine, des auditions ont été conduites auprès de l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) et du Comité Français d'Etude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée (COMIFER).

Description de la méthode

L'expertise est basée sur une revue bibliographique qui a consisté, d'une part, à réaliser une analyse critique des travaux européens existants sur le sujet et, d'autre part, à faire un état de l'art du transfert du cadmium depuis les sources environnementales d'apport en cadmium dans les sols agricoles jusqu'à l'exposition du consommateur en vue de la proposition de niveaux maximaux en cadmium dans les matières fertilisantes. Ce travail bibliographique a mené à la construction d'un modèle mathématique puis à l'analyse des résultats issus de ce modèle afin de répondre à la question posée.

➤ Analyse critique des travaux européens sur les valeurs limites en cadmium dans les fertilisants

Une analyse critique des travaux européens existants sur le sujet a été réalisée, à savoir :

- Le rapport « Revisiting and updating the effect of phosphate fertilizers to cadmium accumulation in European agricultural soils » de Smolders et Six, publié en 2013.

- Le document « Final Opinion on new conclusion regarding future trends of cadmium accumulation in EU arable soils » du Scientific Committee on Health and Environmental Risks (SCHER), document adopté le 06 janvier 2016 suite à la réunion plénière du 27 novembre 2015.
- Le rapport « Kadmiumhalten måste minska– för folkhälsans skull En riskbedömning av kadmium med mineralgödsel i fokus Rapport från ett regeringsuppdrag. 2011 » de l'Agence suédoise des produits chimiques (KEMI) publié en 2011.

Cette analyse a fait l'objet d'une note transmise aux tutelles le 18 mai 2017.

Smolders et Six (2013) ont eu pour objectif d'étudier l'effet des engrais minéraux phosphatés sur l'accumulation de cadmium dans les sols agricoles européens, en actualisant l'approche « mass-balance » (bilan de masse) réalisée par le CSTE⁵ en 2002⁵ avec des données plus récentes. Le principe de cette approche est d'établir une valeur limite en cadmium dans les engrais phosphatés commercialisés ne menant pas à une accumulation du cadmium dans les sols agricoles, sur la base de la différence entre les entrées et les sorties en cadmium du sol. La concentration en cadmium dans les sols dans l'étude de Smolders et Six est modélisée sur une période de 100 ans compte tenu de la persistance du cadmium dans les sols.

La modélisation mise en œuvre par Smolders et Six, bien que mathématiquement solide, n'est pas entièrement représentative de toutes les conditions pouvant être rencontrées en France. Ces auteurs se basent principalement sur des estimations moyennes européennes (exemples : apport moyen des fertilisants minéraux, caractéristiques des sols (teneurs en Cd, pH...), etc), ne prenant pas en compte des cas particuliers qui peuvent entraîner un transfert sol-plante plus élevé du cadmium. De plus, la dérivation du seuil en cadmium dans le document de Smolders et Six (2013) est basée uniquement sur l'accumulation en cadmium dans les sols et ne prend pas en compte le risque lié à l'alimentation pour le consommateur. La dérivation de ce seuil devrait s'appuyer sur une évaluation du risque utilisant une approche probabiliste et tenant compte de toutes les sources de cadmium ainsi que de tous les paramètres liés à son transfert. L'ensemble des critiques faites par le SCHER lors d'une analyse des travaux de Smolders et Six (2013) va dans le même sens que celles faites par l'Anses et ne valide pas la pertinence d'un schéma européen unique pour l'évaluation. Ces remarques montrent qu'il est indispensable de compléter ces simulations par des situations « pire cas » incluant les combinaisons les plus défavorables des différents facteurs cités. Il en résulte aussi que l'approche moyenne européenne n'est pas représentative du contexte français en 2017.

Même si les hypothèses de Smolders et Six (2013) sont réalistes et semblent couvrir la majorité des situations courantes, il importe que les cas les plus défavorables soient aussi envisagés. Il peut en effet y avoir des situations locales qui conduiraient à une surexposition au cadmium par le jeu de combinaisons de sol/plante/apports plus défavorables. Il convient de s'assurer que des populations de consommateurs ne se trouvent pas surexposées au cadmium par le jeu de telles combinaisons. L'étude récente de Sterckeman *et al.* (2018) confirme ce constat et indique que l'approche « mass-balance » sur la base d'un schéma unique européen (Smolders et Six, 2013) ne tient pas compte des situations les plus défavorables, pouvant notamment être observées sur le sol français.

Ceci semble pertinent dans la mesure où les conclusions issues de l'EAT2 (Anses, 2011a) montrent que des fractions significatives de consommateurs sont surexposées au cadmium par les apports alimentaires. Or, les contaminations alimentaires sont moyennées dans l'étude de Smolders et Six (2013), ce qui a mathématiquement tendance à « écraser » les extrêmes.

Quant à l'étude du KEMI, elle est réalisée dans le contexte environnemental, social et économique suédois et ne peut être transposée directement à la situation française où il est observé des pH et des teneurs en cadmium des sols différents, tout comme les apports d'engrais, de boues de stations d'épuration (STEP) ou d'effluents d'élevage. Le rapport du KEMI rapporte plusieurs observations contradictoires de terrain dans sa discussion et conclut

⁵ CSTE (2002). Scientific Committee on Toxicity, Ecotoxicity and the Environment Brussels, C2/AST/csteop/Cadmium in fertilizers 24092002/D(02).

que l'ajout de quantités significatives de cadmium avec les engrais phosphatés fera à long terme augmenter les concentrations de cadmium dans le sol et très probablement dans les cultures.

L'analyse critique des documents européens (KEMI, 2011; Smolders et Six, 2013 ; SCHER, 2016) confirme donc la nécessité de limiter l'apport en cadmium dans les sols agricoles, notamment par l'intermédiaire d'une diminution des seuils en cadmium dans les matières fertilisantes.

En ce qui concerne la situation française, selon la publication de Belon *et al.* (2012), les apports de cadmium au sol agricole sont majoritairement liés aux engrais minéraux phosphatés et aux effluents d'élevage. Une voie qui semble à privilégier est la limitation des apports en cadmium au sol par les engrais phosphatés commercialisés, la qualité de ces derniers pouvant être d'avantage maîtrisée que celle des effluents d'élevage plus complexes et moins renseignés, qui doivent cependant faire l'objet d'une attention soutenue.

Il a donc été jugé nécessaire de produire un modèle pour évaluer au cours du temps l'évolution de la teneur en cadmium dans les sols français, la contamination des productions végétales et *de facto*, l'exposition alimentaire associée, en tenant compte des spécificités françaises. Cet outil devrait permettre de répondre de façon pertinente et précise à la saisine et proposer une valeur maximale en cadmium dans les matières fertilisantes utilisables en France sur la base d'une méthodologie explicitée et d'une argumentation scientifique rigoureuse. Ce travail s'est focalisé prioritairement sur l'emploi des engrais phosphatés commercialisés, source majoritaire identifiée d'apport en cadmium dans les sols pour laquelle on dispose de nombreuses données scientifiques dont la qualité et la quantité permettent de bâtir un modèle, tout en traitant autant que possible les autres voies d'apport.

➤ **Etat de l'art du transfert du cadmium depuis les apports dans les sols agricoles jusqu'à l'exposition du consommateur en vue de la proposition de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes**

Compte tenu de l'étendue de la question 3 posée dans le cadre de cette saisine, celle-ci considère une source, l'apport en cadmium par les matières fertilisantes, et plusieurs cibles : la contamination des sols agricoles, la contamination des productions végétales et, *in fine*, l'exposition alimentaire du consommateur. Les différents aspects de la problématique, dans l'optique de la construction d'un modèle mathématique, ont été passés en revue grâce à un travail bibliographique faisant l'état de l'art de tous les paramètres à considérer pour étudier cette question. Le schéma conceptuel présenté dans la figure 1 permet, dans cette évaluation, de visualiser le transfert du cadmium le long de la chaîne alimentaire, depuis la source jusqu'aux cibles, et d'identifier les paramètres clés liés à ce transfert.

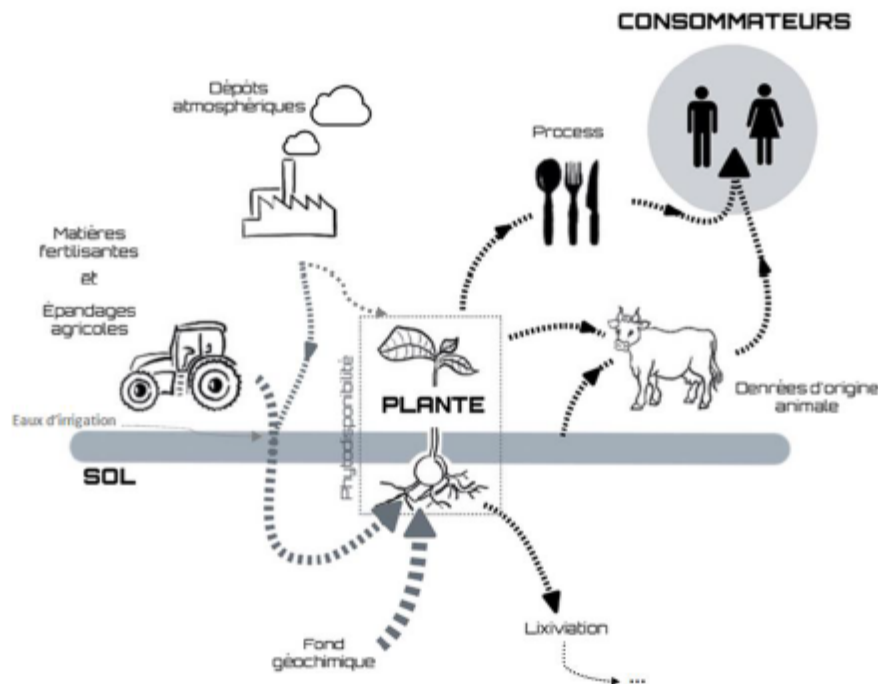


Figure 1. Transfert du cadmium depuis les sources environnementales jusqu'au consommateur

Le cadmium se retrouve dans l'environnement, notamment dans le compartiment sol, du fait de sa présence naturelle dans la roche-mère du sol (fond géochimique). La contamination du sol par le cadmium résulte donc de son origine naturelle et des apports anthropiques liés aux diverses activités humaines et aux pratiques agricoles. En l'occurrence, un sol agricole peut être contaminé en cadmium à la suite d'un épandage de matières fertilisantes contaminées en cadmium, et ceci plus ou moins en fonction des pratiques agricoles et de la qualité du produit épandu. De plus, les eaux d'irrigation peuvent constituer une voie d'entrée, jugée mineure, de cadmium dans les sols. Une autre source d'apport en cadmium qui n'est pas à sous-estimer est le dépôt atmosphérique (Xiong *et al.*, 2014a ; Schreck *et al.*, 2012). Par ailleurs, les paramètres du sol, notamment le pH, modulent la disponibilité du cadmium et son transfert racinaire.

Les sorties du cadmium du sol se font essentiellement par l'intermédiaire des cultures et de la lixiviation. L'érosion des sols de surface provoque le transfert de particules fines riches en cadmium vers les eaux superficielles, dans des proportions qui ne sont pas à négliger (Denaix *et al.*, 2002).

Les denrées d'origine végétale peuvent être contaminées par le cadmium en raison de la présence de celui-ci dans les sols agricoles. En effet, le cadmium soluble présent dans les sols est absorbé par la plante, et peut constituer ainsi un contaminant de la chaîne alimentaire. Ce transfert sol-plante s'effectue principalement par voie racinaire (et aussi parfois par les parties aériennes). Il est influencé ou modulé par de nombreux paramètres liés au type d'intrant agricole, à la physiologie de la plante (qui peut être plus ou moins accumulatrice), elle-même variable en fonction de l'espèce et de la variété, et aux facteurs relatifs à la typologie ou à la physico-chimie des sols.

L'alimentation constitue chez l'Homme la voie majeure d'exposition au cadmium hors tabagisme (Efsa, 2009 et 2012). Le consommateur se trouve exposé au cadmium par la consommation de

denrées alimentaires potentiellement contaminées en cadmium, résultant de la consommation de denrées d'origine végétale à l'état transformé ou non, et aussi de denrées alimentaires d'origine animale par des animaux de rente exposés au cadmium par leur alimentation et le sol.

Dans ce travail, un état de l'art sur les paramètres du transfert du cadmium depuis les sources environnementales d'apport dans les sols agricoles jusqu'à l'exposition du consommateur a été conduit. Les éléments jouant un rôle sur l'exposition au cadmium identifiés dans ce travail sont les suivants :

- le fond pédo-géochimique associé aux teneurs en cadmium naturellement présent dans les sols ;
- le pH des sols, qui constitue un paramètre clé de la phytodisponibilité du cadmium ;
- l'apport en cadmium dans les sols par les matières fertilisantes et les pratiques agricoles associées ;
- l'apport en cadmium dans les sols par les dépôts atmosphériques ;
- l'apport en cadmium dans les sols par les eaux d'irrigation ;
- le transfert du cadmium depuis le sol par la lixiviation ;
- le transfert du cadmium du sol vers la plante, associé à la notion de phytodisponibilité ;
- le transfert du cadmium par consommation de sol par les animaux ;
- l'exposition du consommateur au cadmium résultant du niveau de contamination des aliments consommés et de son niveau de consommation des aliments.

Les éléments liés au fond géochimique, apports en cadmium par les différentes sources, transferts du cadmium vers les eaux, les végétaux et les animaux, et exposition humaine sont décrits en détail dans le rapport associé à l'évaluation de la question 3 de la saisine cadmium.

A l'issue de cet état de l'art, il a été jugé que la démarche d'évaluation envisagée (pour proposer des niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de limiter la contamination des sols agricoles et des productions végétales ainsi que pour réduire l'exposition alimentaire associée) peut s'appuyer sur une approche basée sur un bilan de masse (*mass balance*) entre les entrées et sorties en cadmium du sol agricole, approche analogue à celles employées dans des études récentes (Smolders et Six, 2013 ; KEMI, 2011). Afin de limiter l'accumulation du cadmium dans les sols et son transfert, les entrées en cadmium dans le sol agricole ne doivent pas dépasser ses niveaux de sorties. Une telle approche a été couplée avec une évaluation du risque pour le consommateur à partir des niveaux de contamination en cadmium dans l'alimentation résultant du transfert du cadmium du sol vers l'espèce végétale. Cette démarche doit tenir compte des paramètres impliqués dans le transfert du cadmium le long de la chaîne alimentaire et des spécificités françaises en termes de pratiques agronomiques et des paramètres décrits plus haut.

L'enjeu de la démarche est de diminuer la contamination en cadmium des sols et cultures, afin de préserver la santé du consommateur au regard de son exposition au cadmium.

- **Construction d'un modèle de transfert du cadmium en vue de l'évaluation de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de réduire la pollution des sols agricoles, la contamination des cultures et l'exposition du consommateur**

La méthodologie a permis la construction d'un modèle mathématique évaluant le transfert du cadmium depuis l'apport de la matière fertilisante dans le sol jusqu'à la plante suite à une action à la source, et tenant compte de l'ensemble des voies d'entrées (matières fertilisantes, dépôts atmosphériques, eaux d'irrigation) et des voies de sorties du cadmium du sol (culture à vocation alimentaire et lixiviation) le long de ce transfert. L'évolution des niveaux de contamination en cadmium des cultures en fonction des itinéraires de fertilisation liés à l'usage des matières fertilisantes a ensuite été répercutée sur l'exposition alimentaire associée pour évaluer le risque pour la santé du consommateur. La valeur limite maximale en cadmium dans les matières fertilisantes qui est proposée découle des résultats issus de ce modèle (en fonction de divers

scénarios testés) intégrant les différents processus à l'œuvre de la fourche à la fourchette. La démarche d'évaluation est schématisée sur la figure 2.

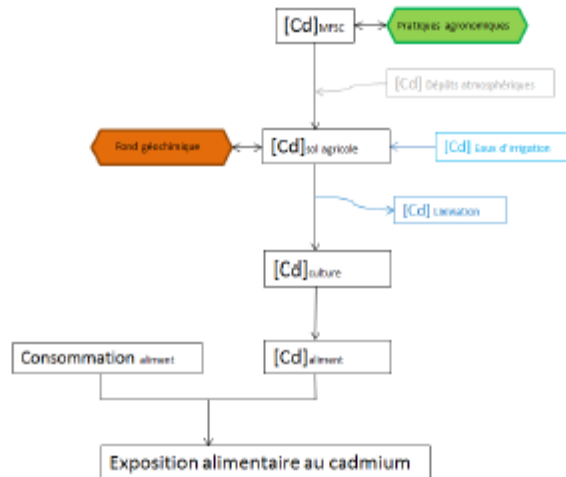


Figure 2. Aperçu schématique de la modélisation du transfert du cadmium depuis l'apport en cadmium dans les sols agricoles par les matières fertilisantes jusqu'au consommateur par l'intermédiaire des productions végétales

La construction du modèle s'est appuyée sur la sélection de paramètres de départ liés aux flux ou apports entrants en cadmium dans les sols agricoles dépendants de différents itinéraires de fertilisation. Cela constitue la base de la construction du modèle et permet de définir les scénarios de fertilisation représentatifs et protecteurs de la contamination des sols agricoles par les matières fertilisantes afin de dériver des valeurs limites en cadmium dans ces matières fertilisantes. Le socle de construction de ce modèle est fonction de la matière fertilisante, des cultures amendées et de la typologie du sol agricole. Les paramètres sélectionnés pour la construction du modèle correspondent aux paramètres susceptibles de jouer un rôle sur la mobilité du cadmium.

Il a d'abord été choisi d'élaborer le modèle à partir de calculs d'itinéraires de fertilisation phosphatée sur la base de l'emploi d'une matière fertilisante de type engrais minéral phosphaté, source majoritaire identifiée d'apport en cadmium dans les sols agricoles. Ce choix permet également de disposer des données maîtrisées pour les engrais minéraux phosphatés et de la possibilité de tester différentes teneurs en cadmium dans l'engrais phosphaté. L'exploitation du modèle, intégrant des données d'entrées liées à des flux entrants de cadmium (résultant des teneurs en cadmium et de la quantité d'apport de la source), a ensuite été élargie à l'usage d'autres matières fertilisantes plus complexes (effluents d'élevage, boues de STEP, digestats de méthanisation) pour lesquels quelques données sont disponibles. Ces autres matières fertilisantes sont, en effet, également susceptibles d'apporter du cadmium dans les sols.

Pour la construction du modèle, des paramètres du sol ayant une influence sur le transfert du cadmium ont été retenus avec en premier lieu, le pH, facteur déterminant de la mobilité du cadmium, et des paramètres liés aux teneurs en matière organique, argile et carbone jouant sur le transfert. Le fond géochimique est également un paramètre à prendre en compte dans la modélisation compte-tenu de son importance sur le stock de cadmium du sol.

La fertilisation de toutes les cultures par les engrais ne pouvant être prises en compte dans la construction du modèle, il a été décidé de limiter le modèle à la fertilisation phosphatée de deux cultures identifiées comme étant à l'origine des aliments contributeurs majeurs à l'exposition du

consommateur au cadmium, c'est-à-dire des céréales et produits à base de céréales ainsi que des pommes de terre et produits apparentés (Anses, 2011a, 2011b, 2016). Dans le cadre des itinéraires de fertilisation phosphatée, les pratiques agricoles courantes liées aux cultures de blé et de pomme de terre ont été considérées. Le modèle s'appuie sur un usage agricole en monoculture blé ou en rotation pomme de terre/blé/blé en fonction d'apports annuels ou d'apports avec un temps d'impasse de deux ans sur la base des préconisations agronomiques et les grilles de coefficient de Arvalis-Institut du Végétal et du Comifer sur la fertilisation phosphatée.

La construction du modèle a été réalisée en deux étapes qui sont représentées sur la figure 3 ci-dessous :

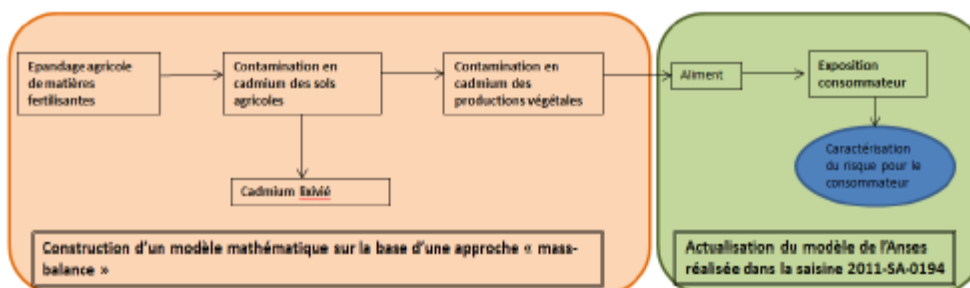


Figure 3. Représentation schématique de la modélisation mise en œuvre dans le but de proposer des valeurs limites en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de maîtriser la pollution en cadmium des sols agricoles, la contamination en cadmium des cultures et l'exposition du consommateur au cadmium

- Modélisation du transfert du cadmium depuis son apport dans les sols agricoles jusqu'à la culture : construction du modèle mathématique sur la base d'une approche bilan de masse « mass-balance »

Dans un premier temps, le transfert du cadmium depuis son apport par les fertilisants sur les sols agricoles jusqu'à la production végétale (pomme de terre et blé) a été modélisé. Cette partie du modèle a été construite sur la base d'une approche de bilan massique, prenant en compte :

- 1) toutes les voies d'entrée du cadmium dans le sol agricole (matières fertilisantes, dépôts atmosphériques et la particularité dans le modèle de considérer les eaux d'irrigation) ;
- 2) les voies de sortie du cadmium depuis le sol agricole (cultures, lessivage);
- 3) et les spécificités françaises susceptibles de moduler ces transferts.

Lorsque les itinéraires de fertilisation sont définis, le modèle s'appuie sur un calcul d'équilibre entre les voies d'entrée et de sortie du cadmium dans le sol agricole en tenant compte des spécificités françaises. Cette approche de type « mass-balance » répond à la formule suivante :

$$[Cd]_{sol,i} = [Cd]_{sol,i-1} + \frac{\text{flux de cadmium entrant dans le sol} - \text{flux de cadmium sortant du sol}}{\text{densité sol}}$$

Avec : $[Cd]_{sol,i}$ = concentration en cadmium dans le sol à l'année i

$[Cd]_{sol,i-1}$ = concentration en cadmium dans le sol à l'année i-1

Les flux entrants en cadmium dans les sols agricoles (matières fertilisantes, dépôts atmosphériques, eaux d'irrigation) s'ajoutent au fond géochimique en cadmium ($[Cd]_{geo}$), qui représente le cadmium présent dans le sol en début de simulation. Les bases de données du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS - GIS SOL (Groupement d'intérêt scientifique Sol⁶)), fournies par l'unité INRA InfoSol ont permis de disposer de la distribution des concentrations du cadmium liée au fond géochimique dans les sols agricoles français dont le modèle tient compte.

A l'issue de cette première phase de modélisation, en fonction des apports en cadmium par les intrants agricoles et de leurs itinéraires de fertilisation ainsi que du temps de projection, il est possible de déterminer :

- la contamination en cadmium des sols agricoles (horizons de surface) ;
- la contamination en cadmium des cultures (grain de blé, pomme de terre) à la suite de la modélisation du transfert sol-plante, et nécessaire au calcul de l'exposition alimentaire ;
- le cadmium lixivié à la suite de la modélisation du transfert du Cd de la phase solide du sol vers la solution du sol.

Il a été choisi de modéliser l'évolution de la concentration en cadmium dans les sols agricoles, dans l'eau lixiviée ainsi que dans les productions végétales suite aux apports en cadmium par les matières fertilisantes sur une période de projection allant de la première année d'apport jusqu'à la 99^{ème} année.

La modélisation de la sortie du cadmium depuis le sol agricole vers les cultures (grain de blé et pomme de terre) et le lixiviat s'est appuyée sur l'intégration d'équations de transfert sélectionnées dans ce travail à l'issue d'une recherche bibliographique (Franz *et al.*, 2008, De Vries, 2011 et 2013, Ran *et al.*, 2016).

En raison de la difficulté d'estimer la véritable part de cadmium biodisponible relative à l'apport de matière fertilisante, la modélisation a considéré le cadmium total entièrement biodisponible représentant une situation protectrice. La spéciation du cadmium dans les intrants agricoles n'a certes pas pu être prise en compte directement, mais indirectement par le biais des caractéristiques du sol (pH, carbonates, etc.) par les équations de transfert.

A cette première phase du modèle, des concentrations modélisées en cadmium dans le sol, le blé, la pomme de terre et les eaux lixiviées sont créées sur 99 ans à l'aide de simulations Monte-Carlo. Pour un itinéraire donné, 10 000 parcelles sont simulées. Les simulations tiennent compte de la diversité des parcelles présentes en France, en particulier en utilisant les données du RMQS-GIS SOL, sur la base des parcelles agricoles (cultures et prairies) parmi les 2059 sols échantillonnés sur le territoire français par le RMQS-GIS SOL. De plus, chaque parcelle est définie par un vecteur contenant la concentration en cadmium liée au fond géochimique, les concentrations en matière organique, en argile et en carbone ainsi que le pH du sol. Les corrélations observées entre ces paramètres dans les parcelles françaises sont prises en compte. Les variations des concentrations en cadmium sont ensuite calculées en fonction de la durée de la modélisation (exemple : 10, 20, 60 et 99 ans) pour les 10 000 parcelles. Certains paramètres, comme la quantité d'eau de pluie, les rendements agricoles ou la quantité d'eau d'irrigation varient d'une parcelle à l'autre et d'une année à l'autre. La variabilité des paramètres a été considérée en tirant aléatoirement une valeur différente par parcelle et par année directement dans les distributions ajustées aux données.

A partir de l'approche « mass-balance » et des équations de transfert et de lixiviation, les concentrations en cadmium sont ensuite simulées sur 99 ans pour les 10 000 parcelles.

L'algorithme a été programmé sous le logiciel R (version 3.4.0, 21-04-2017) et une application a été développée sous R-shiny permettant à l'utilisateur de sélectionner l'itinéraire qu'il souhaite simuler (monoculture blé ou rotation, flux d'apport, etc.). R-Shiny permet de faire l'interface

⁶ Le Groupement d'intérêt scientifique Sol (GIS Sol) a été créé en 2001 pour constituer et gérer un système d'information sur les sols de France et répondre aux demandes des pouvoirs publics et de la société au niveau local et national. Le GIS Sol conçoit, oriente et coordonne l'inventaire géographique des sols, le suivi de leurs propriétés et l'évolution de leurs qualités, et gère le système d'information sur les sols. Le GIS Sol assure également la valorisation des données sur les sols de France, en cohérence avec les programmes européens.

entre la programmation et la présentation sous forme de pages web interactives sur lesquelles il est possible de réaliser toutes les analyses / actions relatives au modèle. Les moyennes et centiles des concentrations en cadmium dans le sol, la plante (blé et pomme de terre) et lixiviées sur l'ensemble des parcelles sont ensuite présentés dans des tables et graphiques. Une analyse en fonction du type de sol (concentration du fond géochimique, matière organique, argile, carbone et pH) ainsi que des paramètres d'entrée (quantité eau de pluie, concentration en Cd des eaux d'irrigation etc.) est fournie. Une analyse de sensibilité au nombre de parcelles simulées a été réalisée et montre que la simulation de 10 000 parcelles est suffisante pour obtenir des résultats stables.

Les paramètres d'entrée, les valeurs et équations intégrées dans la construction du modèle probabiliste relatif à l'approche « mass-balance » du modèle ainsi que l'intégration de la variabilité indiquée précédemment et le traitement de l'incertitude en fonction des paramètres sont présentés dans le tableau 1, et décrits dans le rapport d'expertise de la question 3 associé.

Tableau 1. Paramètres d'entrée intégrés dans la construction du modèle probabiliste lié à la phase matière fertilisante-sol-plante du modèle, valeurs et équations relatives au flux entrant en Cd et flux sortant en Cd du sol de l'approche « mass-balance » sur lesquelles le modèle s'appuie et inclut l'intégration de la variabilité et le traitement de l'incertitude

Paramètres du modèle	Distribution	Valeurs et équations					Unités	Sources	Variabilité		Incertitude		
									Parcelles	Années	Intégrée	Existante	
Paramètres d'entrée liés à l'approche « mass-balance »													
Fond géochimique cadmium	[Cd] _{geo}	Empirique	Minimum	Médiane	Moyenne	95 ^{ème} centile	Maximum	mg.kg ⁻¹	RMQS GIS Sol - © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017	x	-	x	x
			0,010	0,216	0,297	0,849	5,530						
Densité du sol	Wsol	Triangulaire	Minimum	Médiane	Moyenne	95 ^{ème} centile	Maximum	kg.m ⁻³	RMQS GIS Sol - © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017	x	-	x	x
			205	1 310	1 282	1 712	2 251						
Flux entrant en cadmium dans le sol agricole													
Apport en Cd dans les sols agricoles via les matières fertilisantes (sur la base des engrais phosphatés comme source référente)	[Cd] _{fertilisant}		[Cd] _{fertilisant} = [Cd] _{type MF} x dose _{phosphoresol,culture,année}				mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹						

Expertise collective : synthèse et conclusions

Saisine n°2015-SA-0140 Exposition au cadmium

Paramètres du modèle		Distribution	Valeurs et équations					Unités	Sources	Variabilité		Incertitude		
			Minimum	Médiane	Moyenne	90 ^{ème} centile	Maximum			Parcelles	Années	Intégrée	Existante	
Concentration cadmium via les dépôts atmosphériques	[Cd] _{atm}	Empirique	Minimum	Médiane	Moyenne	90 ^{ème} centile	Maximum	µg/m ³	Belon et al., 2012	x	x	x	x	
			9,2	23,8	26,4	41,6	76,2							
Concentration cadmium via les eaux d'irrigation	[Cd] _{eau, irrig}	LogNormale Tronquée	Minimum	Médiane	Moyenne	90 ^{ème} centile	Maximum	µg.L ⁻¹	FOREGS database	x	-	x	x	
			1.10 ⁻⁴	0,01	0,03	0,08	1,24							
Quantité d'eau d'irrigation blé	Q _{irrig,blé}	Triangulaire	Minimum	Médiane	Moyenne	90 ^{ème} centile	Maximum	L.ha ⁻¹	Arvalis, Comifer	x	x	x	x	
			200 100	573 174	629 653	1 079 806	1 484 662							
Quantité d'eau d'irrigation pomme de terre	Q _{irrig,pdt}	Triangulaire	Minimum	Médiane	Moyenne	90 ^{ème} centile	Maximum	L.ha ⁻¹	Arvalis, Comifer	x	x	x	x	
			1 005 000	1 500 000	1 560 000	2 060 000	2 488 000							
Transfert du cadmium dans les sols agricoles via les eaux d'irrigations	[Cd] _{transfert eau irrig}		[Cd] _{transfert eau irrig} = [Cd] _{eau irrig} - X Q _{irrig blé, pdt}					mg.ha ⁻¹						
Flux sortant en cadmium du sol agricole														

Paramètres du modèle		Distribution	Valeurs et équations					Unités	Sources	Variabilité		Incertitude	
			Minimum	Médiane	Moyenne	95 ^{ème} centile	Maximum			Parcelles	Années	Intégrée	Existante
Carbone	Carbone	Empirique	2,6	17,3	21,6	48	145	$5 \cdot 10^{-5}$	RMQS GIS Sol - © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017	x	-	x	x
pH sol	pH	Empirique	4,5	6,53	6,70	8,20	8,70	-	RMQS GIS Sol - © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017	x	-	x	x
Concentration cadmium dans la solution du sol	$[Cd]_{ss}$		$[Cd]_{ss} = [Cd]_{soil} / KD$ Avec : $\log_{10} KD = 1,547 + 0,671 \cdot \log_{10}(\text{Carbone}) + 0,362 \cdot \text{pH} - 0,943 \cdot \log_{10}(\text{DOC})$					$\mu\text{g Cd.L}^{-1}$	De Vries <i>et al.</i> , 2011 ; De Vries <i>et al.</i> , 2013				
Précipitations annuelles	Q_{pa}	Empirique	202	746,2	776,3	1205,8	2256	L.ha^{-1}	FOCUS 2005-2015 (Anses-DEPR)	x	x	x	x
Transfert du cadmium via la lixiviation	$[Cd]_{li}$		$[Cd]_{li} = [Cd]_{ss} \times 0,3 \times (Q_{pa} + Q_{irrig, bk, pdt})$					$\mu\text{g.ha}^{-1}$					

Expertise collective : synthèse et conclusions

Saisine n°2015-SA-0140 Exposition au cadmium

Paramètres du modèle	Distribution	Valeurs et équations						Unités	Sources	Variabilité		Incertitude		
		Minimum	Médiane	Moyenne	95 ^{ème} centile	Maximum	Parcelles			Années	Intégrée	Existante		
Matière organique	MO	Empirique	0,447	3,73	3,03	8,30	25,10	g.kg ⁻¹	RMQS GIS Sol - © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017	x	-	x	x	
pH sol	pH	Empirique	4,5	6,53	6,70	8,20	8,70	-	RMQS GIS Sol - © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017	x	-	x	x	
Argile	Argile	Empirique	31	217	247,3	497	798	g.kg ⁻¹	RMQS GIS Sol - © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017	x	-	x	x	
Transfert du cadmium dans les cultures	[Cd] _{sol}		$\text{Blé (grain)} : \log [\text{Cd}]_{\text{sol}} = 0.703 + 1.04 \log [\text{Cd}_{\text{sol}}] - 0.175\text{pH}$ $\text{Pomme de terre} : \log [\text{Cd}]_{\text{sol}} = 0.97 - 0.41 \times \log[\text{MO}] - 0.20 \times \log[\text{argile}] + 0.81 \times \log[\text{Cd}_{\text{sol}}] - 0.21 \times \text{pH}$						mg.kg ⁻¹	Ran et al., 2016 Franz et al., 2008				
Rendement blé	R _{blé}	Triangulaire	2 800	7 000	6 700	10 200		Kg.ha ⁻¹	Anvalis, Comifer	x	x	x	x	
Rendement pomme de terre	R _{pt}	Triangulaire	45 000	47 500	47 500	50 000		Kg.ha ⁻¹	Anvalis, Comifer	x	x	x	x	

o **Modélisation de l'exposition du consommateur : actualisation du modèle de l'Anses (saisine 2011-SA-0194)**

Dans un deuxième temps, le transfert du cadmium de la production végétale vers l'assiette du consommateur a été modélisé. Cette seconde partie du modèle s'est appuyée sur un modèle existant établi par l'Anses, dans le cadre de la demande d'avis relatif à la révision des teneurs maximales en cadmium dans les denrées alimentaires dans le contexte de la saisine 2011-SA-0194 (Anses, 2011b). Ce modèle a été mis à jour pour évaluer l'exposition alimentaire associée. Les simulations effectuées avec le modèle permettent d'obtenir préalablement les variations de concentration en cadmium (réduction ou augmentation) dans les grains de blé et les pommes de terre au cours du temps par rapport à la première année d'apport de référence en fonction du scénario de fertilisation. La méthode actualisée de la saisine 2011-SA-0194 consiste à répercuter ces variations, exprimées en pourcentage moyen de réduction ou augmentation, de la concentration en cadmium obtenues dans ces plantes en fonction des scénarios de fertilisation, sur la contamination moyenne en cadmium des aliments et ingrédients à base de blé et pomme de terre (contributeurs majeurs à l'exposition du consommateur au cadmium) issue de la deuxième EAT (Anses, 2011a) permettant d'estimer l'impact sur l'exposition du consommateur au cadmium.

L'exposition alimentaire chronique a été calculée de façon individuelle pour l'ensemble des sujets de l'étude INCA2⁷ (Afssa, 2009) selon la formule suivante :

$$E_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n C_{ik} \times L_{kj}}{BW_i}$$

Où :

E_{ij} est l'exposition au contaminant j (ici cadmium) pour le sujet i,

C_{ik} est la consommation journalière moyenne de l'aliment k par le sujet i (k=1 à n),

L_{kj} est la teneur en contaminant j de l'aliment k,

BW_i est le poids corporel du sujet i.

Les données de consommation alimentaire utilisées proviennent de l'étude INCA2 (Afssa, 2009). Les hommes et femmes adultes correspondent aux individus de 18 à 79 ans. A noter que les individus sous-déclarants n'ont pas été retenus pour le travail. En tout, 1918 individus adultes et 1444 enfants de 3 à 17 ans ont été considérés. Ces effectifs sont suffisants pour calculer le 95^{ème} centile d'exposition⁸.

Les données de contamination des aliments par le cadmium proviennent de la seconde étude de l'alimentation totale française (EAT2) (Anses, 2011a). Les données censurées (inférieures aux limites analytiques) ont été traitées dans un premier temps selon 3 hypothèses adaptées des recommandations de l'OMS⁹ : lowerbound (LB), middlebound (MB) et upperbound (UB).

Dans le scénario LB, les résultats de type « non détecté » sont remplacés par zéro, les résultats de type « non quantifié » sont remplacés par la valeur de la limite de détection (LOD). Dans le scénario MB, les résultats de type « non détecté » sont remplacés par ½ de la LOD, les résultats de type « non quantifié » sont remplacés par ½ de la somme de la limite de quantification (LOQ) et de la limite de détection (soit (LOQ+LOD)/2). Dans le scénario UB, les résultats de type « non détecté » sont remplacés par la LOD, les résultats de type « non quantifié » sont remplacés par la LOQ.

Les modifications (réductions ou augmentations en %) de concentration en Cd de la plante (blé (grain) et pomme de terre) identifiées préalablement sont répercutées sur la concentration des aliments à base de blé et pomme de terre tels que consommés. Il en résulte l'estimation de

⁷ AFSSA (2009). Etude Individuelle Nationale des Consommations Alimentaires 2 (INCA2) (2006-2007)

⁸ EFSA (2008). Guidance Document for the use of the Conise European Food Consumption Database in Exposure Assessment.

⁹ WHO (2013). Reliable evaluation of low-level contamination of food. Addendum of the report on GEMS/Food-EURO second workshop of the 26-27th May 1995.

l'exposition totale du consommateur. Les conséquences de la modification des teneurs en cadmium dans les aliments à base de blé sont transformées par l'intermédiaire de calculs liés à la décomposition des recettes pour les aliments à base de blé tendre et de blé dur (Jean *et al.*, 2015) décrits dans le rapport d'expertise de la question 3.

In fine, les données de sortie du modèle permettent de déduire l'exposition chronique moyenne et au 95^{ème} centile du consommateur adulte et enfant, en fonction du temps de projection de la modélisation (10, 20, 60, 99 ans), en corrélation avec l'étude de l'évolution de la contamination du cadmium dans les cultures (blé et pomme de terre) liée aux scénarios de fertilisation entrés dans le modèle. Le taux de dépassement de la valeur toxicologique de référence (VTR) par voie orale du cadmium ainsi que son intervalle de confiance à 95% (IC_{95%}) selon le scénario, sont calculés sur la base de la VTR révisée par l'Anses dans le cadre de la question 1 de la saisine.

- **Sélection des flux entrants en cadmium par les matières fertilisantes testés dans le modèle afin de dériver des niveaux en cadmium dans les fertilisants permettant de réduire la contamination des sols agricoles et des cultures jusqu'à l'exposition du consommateur**

Le modèle est d'abord utilisé pour des itinéraires de fertilisation phosphatée sur la base de l'emploi d'engrais minéraux phosphatés, source majoritaire identifiée d'apport en cadmium dans les sols agricoles. Le modèle s'appuie sur un usage agricole en monoculture blé ou en rotation pomme de terre/blé/blé.

L'emploi des engrais minéraux phosphatés est dépendant des besoins en phosphore de la culture et de l'offre en phosphore du sol en France (pauvre, moyen, riche). Il a donc été décidé de considérer les itinéraires de fertilisation les plus enclins à l'apport en cadmium dans les sols agricoles et liés à des sols pauvrement pourvus en phosphore par rapport aux exigences des plantes en phosphore. Cette situation maximaliste nécessitant le plus d'apport en engrais minéraux phosphatés représente un tiers des sols en France (RMQS – GIS SOL). Les doses d'apport liées aux itinéraires de fertilisation considérées dans le modèle s'appuient sur les préconisations agronomiques et les grilles de coefficient de Arvalis-Institut du Végétal et du Comifer sur la fertilisation phosphatée (<http://fertilisation-edu.fr/cultures-fiches-pratiques/> et d'après les recommandations d'apport en P & K selon la méthode COMIFER, 2009), ainsi que sur les auditions menées dans le cadre de cette saisine. Les itinéraires de fertilisation considérés pour le modèle sont les suivants:

- monoculture blé :
 - apport annuel de 80 kg P₂O₅.ha⁻¹.an⁻¹ ;
 - et apport de 100 kg P₂O₅.ha⁻¹.an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans.
- rotation pomme de terre/blé/blé :
 - apport annuel de 100 kg P₂O₅.ha⁻¹.an⁻¹;
 - et apport de 180 kg P₂O₅.ha⁻¹.an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans.

Les doses d'apports phosphatés sont ensuite croisées avec la concentration en cadmium dans la matière fertilisante afin d'obtenir le flux entrant en cadmium dans les sols agricoles par l'engrais phosphaté.

Pour la concentration en cadmium dans l'engrais minéral phosphaté entrée dans le modèle, l'hypothèse de départ consiste à utiliser le seuil réglementaire actuel normé dans les engrais phosphatés de 90 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ ainsi que les seuils réduits proposés dans le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE de la Commission européenne pour les engrais phosphatés de 60, 40 et 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹. Ces seuils sont considérés fixes ou dégressifs (en accord avec une proposition du projet de révision de la réglementation) au cours de la modélisation comme résumé dans le tableau 2. Le modèle est ainsi adapté en fonction des seuils en cadmium constants ou dégressifs dans l'engrais phosphaté apporté au sol agricole durant le temps de projection.

Tableau 2. Hypothèses de seuils en cadmium dans les engrais phosphatés testés dans le modèle probabiliste

Concentration en Cd dans l'engrais phosphaté	Seuils fixes au cours de la modélisation (mg Cd. kg P ₂ O ₅ ⁻¹)	Durée de projection: 1 à 99 ans			
		90	60	40	20
	Seuils dégressifs au cours de la modélisation (mg Cd. kg P ₂ O ₅ ⁻¹)	Année 1 à 3	Année 4 à 15	Année 16 à 99	
	60	40	20		

En couplant les doses d'apport et les teneurs en cadmium à tester selon les itinéraires de fertilisation (monoculture blé ou rotation) : cela représente vingt scénarios d'itinéraires de fertilisation liés à l'usage d'engrais minéraux phosphatés testés dans le modèle (tableau 3).

Tableau 3. Présentation des scénarios d'itinéraires de fertilisation liés aux flux entrants relatifs à l'emploi d'engrais phosphatés testés dans le modèle

N° scénario	Pratique culturale	Dose d'apport de l'engrais phosphaté (kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹)	Teneur en Cd testée dans l'engrais phosphaté (mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹)
1	Monoculture blé	80	90
2	Monoculture blé	80	60
3	Monoculture blé	80	40
4	Monoculture blé	80	20
5	Monoculture blé	100 avec un temps d'impasse de 2 ans	90
6	Monoculture blé	100 avec un temps d'impasse de 2 ans	60
7	Monoculture blé	100 avec un temps d'impasse de 2 ans	40
8	Monoculture blé	100 avec un temps d'impasse de 2 ans	20
9	Rotation Pomme de terre/blé/blé	100	90
10	Rotation Pomme de terre/blé/blé	100	60
11	Rotation Pomme de terre/blé/blé	100	40
12	Rotation Pomme de terre/blé/blé	100	20
13	Rotation Pomme de terre/blé/blé	180 avec un temps d'impasse de 2 ans	90

Expertise collective : synthèse et conclusions

Saisine n°2015-SA-0140 Exposition au cadmium

N° scénario	Pratique culturale	Dose d'apport de l'engrais phosphaté (kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹)	Teneur en Cd testée dans l'engrais phosphaté (mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹)
14	Rotation Pomme de terre/blé/blé	180 avec un temps d'impasse de 2 ans	60
15	Rotation Pomme de terre/blé/blé	180 avec un temps d'impasse de 2 ans	40
16	Rotation Pomme de terre/blé/blé	180 avec un temps d'impasse de 2 ans	20
17	Monoculture blé	80	60 sur les trois premières années d'apport → 40 pendant 12 ans → 20 (en accord avec le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE)
18	Monoculture blé	100 avec un temps d'impasse de 2 ans	60 sur les trois premières années d'apport → 40 pendant 12 ans → 20 (en accord avec le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE)
19	Rotation Pomme de terre/blé/blé	100	60 sur les trois premières années d'apport → 40 pendant 12 ans → 20 (en accord avec le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE)
20	Rotation Pomme de terre/blé/blé	180 avec un temps d'impasse de 2 ans	60 sur les trois premières années d'apport → 40 pendant 12 ans → 20 (en accord avec le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE)

Ces scénarios correspondent à des flux entrants en cadmium apportés par les engrais minéraux phosphatés intégrés dans le modèle. Le tableau suivant présente les correspondances entre les scénarios d'itinéraire de fertilisation des engrais minéraux phosphatés selon les quantités épandues et fonction des teneurs en cadmium testées de façon fixe durant la modélisation avec les flux correspondant.

Tableau 4. Correspondances entre les scénarios d'itinéraire de fertilisation des engrais minéraux phosphatés fonction des teneurs en cadmium testées de façon fixe durant la modélisation avec les flux correspondant

	Numéro scénario d'itinéraire de fertilisation	Concentration Cd dans le fertilisant (mg.kg P ₂ O ₅ ⁻¹)	Quantité d'engrais épandu (kg P ₂ O ₅ .ha⁻¹)	Flux de Cd amené au sol (kg.ha⁻¹)	Flux annuel Cd (g.ha⁻¹.an⁻¹)
Épandage annuel pour une monoculture de blé	4	20	80	1,60	1,60
	3	40		3,20	3,20
	2	60		4,80	4,80
	1	90		7,20	7,20
Épandage avec deux ans d'impasse pour une monoculture de blé	8	20	100	2	0,67
	7	40		4	1,33
	6	60		6	2
	5	90		9	3
Épandage annuel pour une rotation pomme de terre/blé/blé	12	20	100	2	2
	11	40		4	4
	10	60		6	6
	9	90		9	9
Épandage avec deux ans d'impasse pour une rotation pomme de terre/blé/blé	16	20	180	3,60	1,20
	15	40		7,20	2,40
	14	60		10,80	3,60
	13	90		16,20	5,40

Les modélisations des transferts du cadmium issues des itinéraires de fertilisation liés à l'emploi d'engrais minéraux phosphatés depuis les sols jusqu'aux cultures et eaux de lixiviation présentent la particularité dans ce travail d'être accompagnées de comparaisons des flux entrants sur les sols avec des fertilisants d'origine organique. En effet, les flux de cadmium apportés au sol par les engrais minéraux phosphatés ont été comparés avec ceux liés aux fertilisants d'origine organique, afin de discuter de façon plus complète les phénomènes d'accumulation du cadmium dans les divers compartiments. Pour cela, ont été dérivés des flux en cadmium pour différents fertilisants d'origine organique susceptibles d'être utilisés lorsque des données suffisantes étaient disponibles.

Le tableau 5 présente les flux d'apport en cadmium dans les sols agricoles dérivés pour des fertilisants d'origine organique correspondant aux boues de STEP, aux fumiers de bovins et aux digestats de méthanisation et qui ont été testés dans le modèle.

A noter que parmi les matières fertilisantes, les amendements calciques et magnésiens ne sont pas pris en compte dans le modèle en raison de leur très faible contribution à la contamination en cadmium.

Tableau 5. Flux liés aux apports de fertilisants d'origine organique testés dans le modèle

	Concentration moyenne du Cd dans l'amendement organique (mg.kg ⁻¹ MS)	Quantité d'azote total (kg.t ⁻¹ MS)	Quantité d'amendement épandue au seuil 170 kgN.ha ⁻¹ (t MS. ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Flux Cd au sol en un apport (g.ha ⁻¹ .an ⁻¹)
Boues de STEP (B)	1,8	Sans objet	3	4,8
Fumier de bovins (FB)	0,3	20	8,5	2,55
Digestat de méthanisation à la ferme (DMF)	0,7	68	2,5	1,75
Scénario complémentaire	Seuil réglementaire en Cd dans le digestat	Quantité d'azote total (kg.t ⁻¹ MS)	Quantité d'amendement épandue au seuil 170 kgN.ha ⁻¹ (t MS. ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Flux Cd au sol en un apport (g.ha ⁻¹ .an ⁻¹)
Digestat Cd max de méthanisation à la ferme (DCdMF)	3	68	2,5	7,5

(d'après Plateau (2001), Chambre d'agriculture Bretagne et al. (2007), Irstea et SOLAGRO (2012), Benoit et al. (2014), Wolf environnement (2001))

Les quantités épandues présentées dans le tableau 5 correspondent aux pratiques possibles. Pour les effluents d'élevage et les digestats issus de méthanisation à la ferme (pratique la plus observée en France, par opposition aux digestats de déchets et de la méthanisation territoriale) (Irstea et SOLAGRO, 2012), ces quantités ont été calculées sur la base d'un apport d'azote correspondant au seuil maximal de la directive nitrate¹⁰ qui fixe un apport de 170 kg d'azote.ha⁻¹.an⁻¹. Pour les boues de STEP, le seuil maximal autorisé par la réglementation a été retenu. En effet, les quantités d'azote et la nature physique des boues (liquide, pâteuse ou solide) sont variables. Il a été choisi de partir du seuil maximal d'apport autorisé par la réglementation (3 tonnes MS.ha⁻¹.an⁻¹)¹¹.

Par conséquent, le modèle mathématique construit présente la particularité d'être adapté selon la nature de la matière fertilisante apportée pour toutes les simulations en permettant de faire varier les flux entrants en cadmium en fonction des pratiques agronomiques et du temps de projection jusqu'à 99 ans.

➤ Analyse des résultats de la modélisation

En préambule de l'analyse des résultats, la pertinence prédictive du modèle a été évaluée au regard des concentrations en cadmium dans le sol, le blé, la pomme de terre et le lixiviat générées par le modèle mathématique au début des simulations.

Au regard des concentrations retrouvées dans les sols, les concentrations en cadmium dans les sols liées au bruit de fond pédo-géochimique sont cohérentes avec celles observées en France (RMQS-GIS SOL) et plus largement au niveau européen. Ainsi, par exemple, les concentrations, moyenne et médiane, modélisées sont de 0,3 et 0,2 mg Cd.kg⁻¹ de sol. Les concentrations nationales moyennes et médianes en cadmium des horizons de surface des sols français selon la base de données RMQS sont de 0,30 et 0,19 mg.kg⁻¹ respectivement, tandis que la base européenne GEMAS (Birke *et al.*, 2017) présente une concentration médiane en cadmium des sols européens de 0,18 mg.kg⁻¹.

Pour les concentrations en cadmium modélisées dans les cultures à un instant t à partir d'un jeu de combinaisons de sols, le tableau ci-dessous montre que les données de concentrations en cadmium calculées grâce au modèle pour le blé et la pomme de terre sont du même ordre de grandeur (même si significativement plus élevées) que les teneurs mesurées dans ces mêmes cultures par l'Efsa (2009), dans les plans de surveillance et de contrôle en France durant la période 2010-2015 et que les valeurs précédemment modélisées dans une étude par Römken *et al.* (2017).

¹⁰ Directive 91/676/CEE du Conseil, du 12 décembre 1991, concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles, sur EUR-Lex, Journal officiel n° L 375 du 31/12/1991 p. 0001 - 0008 (consulté le 3 mai 2018).

¹¹ Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées

Tableau 6. Comparaison entre les concentrations en cadmium (exprimées en mg Cd. kg⁻¹ de la partie comestible de la plante) calculées avec le modèle mathématique de la saisine avec celles précédemment prédites par Römken *et al.* (2017) ou mesurées dans les grains de blé et pomme de terre au niveau français par les plans de surveillance et de contrôle (PS/PC) (années 2010 à 2015) et au niveau européen (Efsa, 2009).

Culture	Modèle de la saisine (2018)			Modèle Römken <i>et al.</i> (2017)			Efsa (2009)			Données PS/PC de la DGCCRF (années 2010-2015) P50
	P05	P50	P95	P05	P50	P95	P05	P50	P95	
Blé (grain)	0,03	0,07	0,20	0,03	0,06	0,14	0,005	0,02	0,08	0,02
Pomme de terre	0,02	0,04	0,08	0,004	0,009	0,03	0,005	0,02	0,07	0,01

*Les valeurs en gras indiquent les concentrations maximales en cadmium pour chaque condition.

Pour les concentrations en cadmium dérivées avec le modèle pour les lixiviats, les données de sorties montrent des résultats sensiblement similaires aux seules données indiquées par Smolders et Six (2013): le modèle présente une teneur moyenne de Cd lixivié maximale pour chaque simulation de 2,4 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹ tandis que l'étude de Smolders et Six fait part d'une lixiviation moyenne en Europe de 2,56 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹.

Par conséquent, le modèle élaboré, constitue un support prédictif cohérent pour estimer, en fonction de scénarios réalistes d'apports de cadmium au sol, l'évolution de la part de cadmium lixivié ainsi que l'évolution des niveaux de contamination en cadmium dans les sols agricoles, dans les plantes (blé et pomme de terre) et dans les produits alimentaires finaux apparentés. La méthode permet d'évaluer quantitativement le risque sanitaire associé.

L'algorithme programmé et mis en application sous R-shiny pour l'utilisateur dispose d'un onglet permettant de vérifier le bilan massique en fonction des compartiments. Ainsi, le bilan de masse de chaque simulation a pu être vérifié.

Le raisonnement pour dériver des niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes s'appuie d'une part, sur une réflexion d'une teneur en cadmium dans un produit (par exemple pour les engrais minéraux phosphatés commercialisés), et d'autre part, sur une réflexion liée à un flux d'apport en cadmium par les matières fertilisantes dans le but d'une maîtrise d'apport en cadmium sur les sols agricoles.

Par ailleurs, en complément des itinéraires de fertilisation testés dans le modèle, il a aussi été modélisé un scénario sans apport de cadmium par les intrants agronomiques (les apports en cadmium dans ce scénario sont uniquement liés aux dépôts atmosphériques et eaux d'irrigation s'ajoutant à la présence du fond géochimique).

Les résultats des simulations ont été analysés au regard, d'une part, du risque sanitaire et, d'autre part, des caractéristiques des sols agricoles récepteurs. Le rapport de la question 3 présente de façon détaillée les résultats et l'analyse associée.

o Analyse des résultats au regard du risque sanitaire

La méthodologie mise en œuvre, s'appuyant sur la construction d'un modèle mathématique simulant le transfert du cadmium depuis l'apport de l'intrant agricole jusqu'au consommateur, constitue un support prédictif sur la proposition de niveaux en cadmium, en termes de teneurs en cadmium dans le produit ou de flux en cadmium quelle que soit la nature et/ou le total de matières fertilisantes apportées au sol agricole.

Cet outil présente l'avantage d'être basé sur les données fiables actuellement disponibles sur le sujet et d'explicitier clairement les choix effectués, ce qui permettra le cas échéant de prendre en compte des données et connaissances nouvelles.

Au regard des résultats obtenus dans les matrices sol-plante (grain de blé, pomme de terre)-lixiviation et des simulations testées dans le modèle dans un premier temps avec des itinéraires de fertilisations liés à l'emploi d'engrais minéraux phosphatés, les résultats obtenus montrent qu'en abaissant la teneur en cadmium des engrais minéraux phosphatés, sur une durée de 99 ans, le transfert du cadmium vers la plante et l'eau lixiviée sont réduits puisque les sols seront à terme plus faiblement contaminés.

Ces résultats sont présentés au moyen de figures sous forme de boîtes à moustaches (*boxplots*) réalisées pour faciliter la lecture et la compréhension des résultats des simulations. Ces boxplots présentent les pourcentages de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75 et P95) et de la moyenne des niveaux de contamination modélisés dans les matrices sol-culture-eau lixiviée, en fonction du temps (résultats présentés pour 10, 20, 60 et 99 ans de projection) par rapport à la première année d'apport de référence, suivant l'itinéraire de fertilisation (monoculture blé et rotation pomme de terre/blé/blé) et des teneurs en Cd testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ de façon fixe ou dégressive au cours de la simulation). La légende explicative de l'interprétation de boxplot est présentée dans la figure 4.



Figure 4. Représentation schématique de l'interprétation des résultats des pourcentages de variations identifiés pour les matrices sol-culture-lixivié issues de la modélisation par rapport à la première année de référence sous forme de boxplots

Les figures 5 et 6 liées à deux exemples de résultats de simulations obtenus en fonction de l'itinéraire de fertilisation et des teneurs en cadmium testées illustrent les observations faites au cours de l'analyse. La figure 5 montre, pour un itinéraire monoculture blé avec un apport annuel de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹, que les teneurs en cadmium augmentent de façon significative (environ 10% de variation) dans les sols. Cette augmentation est proportionnelle dans la culture, dès 10 ans, avec des teneurs croissantes en cadmium testées dans l'engrais de 40, 60 et 90 mg.kg⁻¹ P₂O₅, exceptés en présence d'une teneur de 20 mg.kg⁻¹ P₂O₅ testée dans l'engrais minéral phosphaté. Cette figure présente les résultats liés à un itinéraire de fertilisation entraînant parmi toutes les simulations réalisées l'observation des plus importantes accumulations en cadmium dans le sol et transferts de celui-ci vers la culture et le lixivié avec des teneurs croissantes en cadmium dans l'engrais minéral phosphaté.

En revanche, en cas d'impasse, c'est à dire le scénario pour lequel un seul apport d'engrais minéral phosphaté est réalisé sur 3 ans, les résultats montrent pour ces scénarios des réductions significatives dès 10 ans de projection de l'accumulation du cadmium dans le sol et de son transfert au cours de la modélisation au fur et à mesure que la concentration en cadmium dans l'engrais est réduite de 40 à 20 mg.kgP₂O₅⁻¹ par rapport au seuil actuel réglementaire dans les engrais phosphatés de 90 mg.kgP₂O₅⁻¹. Cela est montré sur la figure 6 présentant les résultats de la modélisation avec un itinéraire en rotation pomme de terre/blé/blé de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans, pour lesquels il est observé, parmi toutes les simulations réalisées, le plus important ralentissement de l'accumulation en cadmium dans le sol et de réduction de son transfert vers les cultures et le lixiviat avec des teneurs décroissantes en cadmium dans l'engrais minéral phosphaté.

Ainsi, lors de l'analyse de l'ensemble des résultats, il est observé sur la durée de simulation du modèle un début de stabilisation et de réduction de l'accumulation en cadmium dans les sols ainsi que de son transfert vers les plantes et le lixiviat dès une teneur en cadmium de 40 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹ dans les engrais phosphatés selon les itinéraires de fertilisation, notamment en présence d'un temps d'impasse de fertilisation de 2 ans. Cette réduction de l'accumulation en cadmium dans les sols et de son transfert vers les cultures et le lixiviat est nettement plus marquée pour une teneur en cadmium réduite à 20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹ dans les engrais phosphatés dans toutes les simulations, avec ou sans temps d'impasse. En revanche, aux deux plus fortes concentrations en cadmium dans l'engrais minéral phosphaté testées dans le modèle soit de 60 et 90 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹, une accumulation en cadmium dans le sol ainsi qu'un transfert significatif de celui-ci dans les cultures et l'eau lixiviée sont constatés quel que soit l'itinéraire de fertilisation en monoculture blé ou rotation pomme de terre/blé/blé, avec ou sans temps d'impasse de 2 ans. Les figures 5 et 6 présentant les résultats de quelques simulations qui corroborent ces constats.

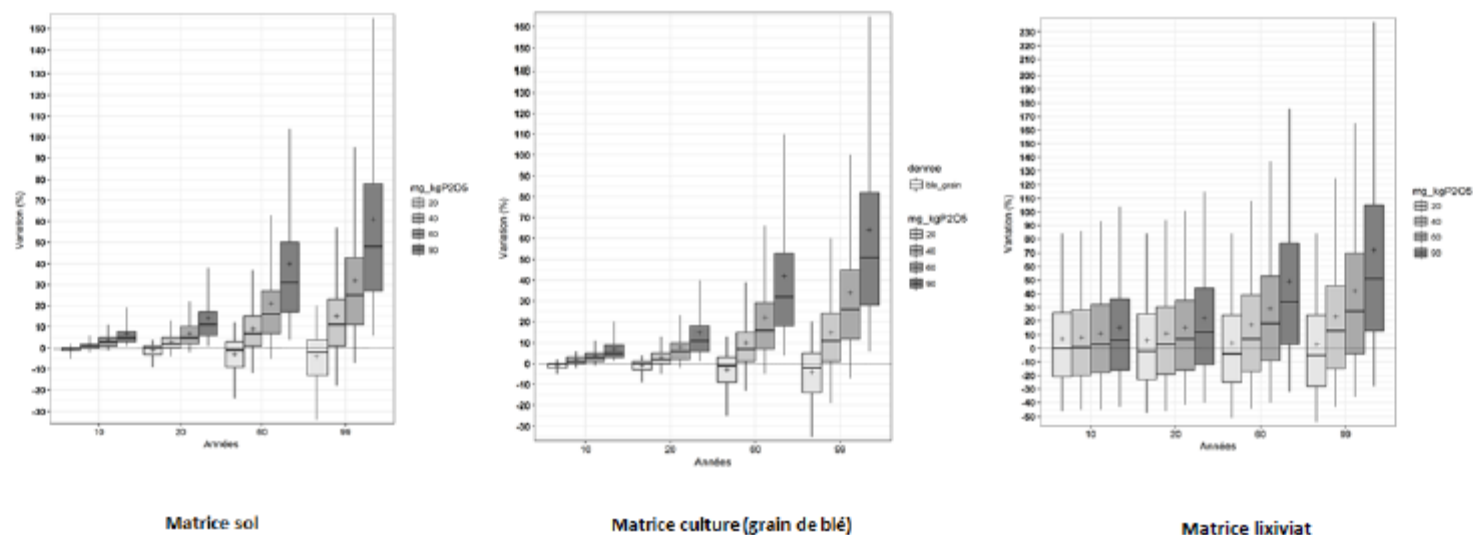


Figure 5. Boxplots représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, de l'accumulation du Cd dans le sol, ainsi que du transfert du Cd vers la culture et le lixiviat en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 80 kg P₂O₅ .ha⁻¹.an⁻¹ et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹) (scénarios 1 à 4)

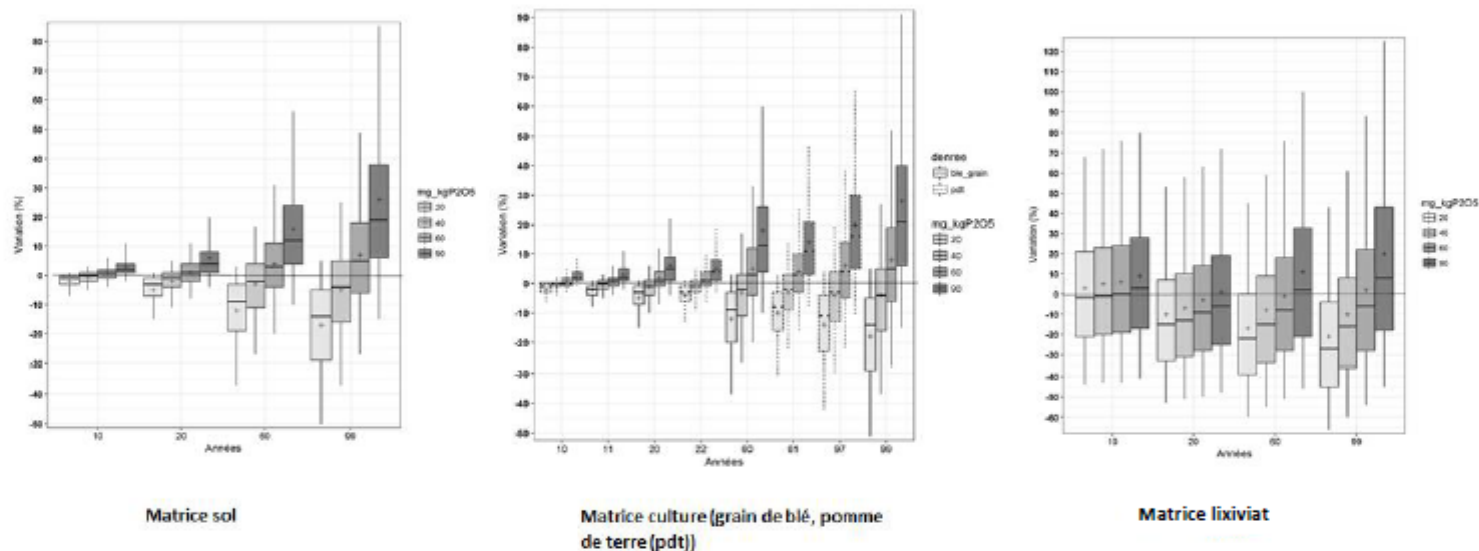


Figure 6. Boxplots représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, de l'accumulation du Cd dans le sol, ainsi que du transfert du Cd vers la culture et le lixiviat en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation rotation pomme de terre/blé/blé 180 kg P₂O₅ .ha⁻¹.an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹) (scénarios 13 à 16)

Lors de l'analyse des bilans de masse entre les compartiments à l'issue des simulations, il est remarqué que le cadmium est davantage transféré dans l'eau lixiviée, comparé aux matrices sol et culture. Même si l'étude de l'évolution du cadmium lixivié en fonction des itinéraires de fertilisation dépasse le contexte strict de la saisine, il est nécessaire de noter que ces transferts vers les eaux souterraines et superficielles contribuent à la contamination diffuse et généralisée de l'environnement qu'il convient de limiter dans toute la mesure du possible en raison des impacts environnementaux et sanitaires induits. Par ailleurs, ces eaux peuvent par la suite être utilisées pour l'irrigation des cultures.

Un effet « espèce végétale » influençant le transfert sol-plante et sol-lixiviation est observé dans les résultats de la modélisation.

L'ensemble de ces observations, dont la réduction du transfert du cadmium vers la plante et l'eau lixiviée avec des sols à terme plus faiblement contaminés, est corroboré avec les scénarios réalistes testés dans le modèle liés à l'emploi de seuils dégressifs en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés dans le temps visant en quinze ans une concentration en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés de 20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹ (en concordance avec le projet de révision de la réglementation relative aux matières fertilisantes après un abaissement progressif des teneurs en cadmium de 60 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹ les trois premières années d'application puis de 40 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹ pendant 12 ans aboutissant à 20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹) (figures 7 et 8).

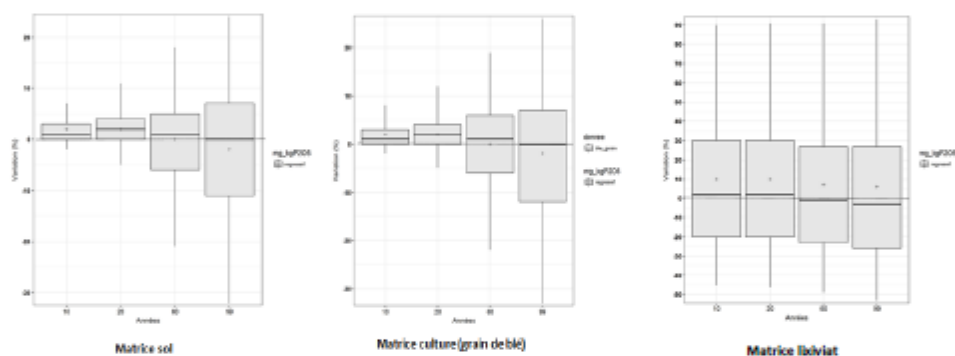


Figure 7. Boxplots représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, de l'accumulation du Cd dans le sol, ainsi que du transfert du Cd vers la culture et le lixivié en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé avec un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ en fonction de concentrations en Cd dégressives (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ (en accord avec le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE)) testées dans l'intrant au cours de la simulation (scénario 17)

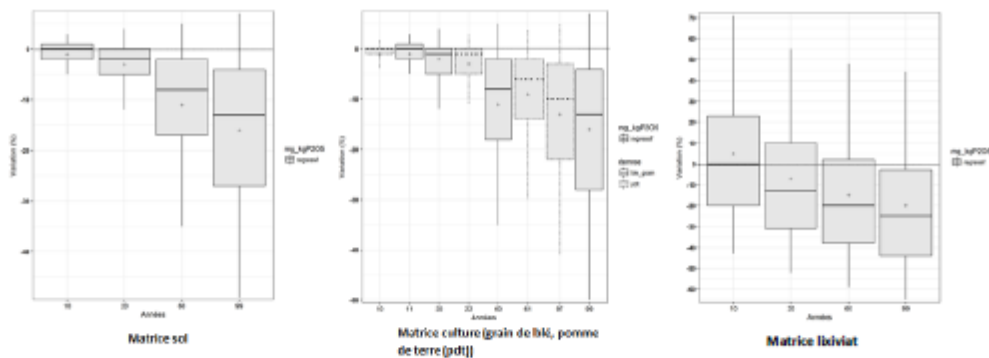


Figure 8. Boxplots représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, de l'accumulation du Cd dans le sol, ainsi que du transfert du Cd vers la culture et le lixiviat en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation rotation pomme de terre/blé/blé avec un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans en fonction de concentrations en Cd dégressives (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ (en accord avec le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE)) testées dans l'intrant (scénario 20) au cours de la simulation

Ces résultats montrent l'intérêt d'un abaissement des teneurs en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés pour préserver la qualité de l'environnement. Une concentration égale ou inférieure à 20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹ permet de réduire à la source les apports de cadmium et de s'orienter vers une meilleure protection de la santé environnementale.

Au regard de la sécurité sanitaire du consommateur, bien qu'un dépassement de la VTR orale du cadmium chez l'adulte et l'enfant soit toujours observé après une action de réduction à la source dans l'engrais minéral phosphaté épandu sur les sols agricoles, les résultats obtenus montrent cependant que si aucune action n'est entreprise pour réduire la teneur en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés, l'impact négatif sera conséquent pour le consommateur. Une augmentation significative du pourcentage de dépassement de la VTR est observée chez les adultes comme chez les enfants, après 60 ou 99 ans de projection dans les situations de référence correspondant à l'usage d'engrais minéraux phosphatés avec le seuil actuel réglementaire normé de 90 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹. Dans ces situations, le pourcentage de dépassement de la VTR chez les enfants serait doublé à partir de 99 ans de projection, avec un tiers ou plus des enfants pour lesquels le risque ne pourrait être écarté. Il est certes observé, avec des itinéraires de fertilisation liés à une teneur en Cd de 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans les engrais minéraux phosphatés (scénarios de fertilisations à seuils en Cd constants ou dégressifs le long de la simulation), un dépassement de la VTR orale du cadmium chez l'adulte et l'enfant, mais avec au bout de 99 ans une réduction significative de ce pourcentage.

Les figures 9 et 10 présentent de façon comparée selon l'hypothèse de traitement de censure (LB, UB) les pourcentages de dépassement de la VTR (0,35 µg Cd.kg p.c⁻¹.j⁻¹) chez les consommateurs adultes et enfants au cours des simulations pour :

- la situation initiale (correspond aux expositions actuelles, présentées dans l'EAT2 (Anses, 2011a), avec la nouvelle VTR calculée dans cette saisine de 0,35 µg Cd.kg p.c⁻¹.j⁻¹);

- les scénarios de référence avec le seuil actuel réglementaire de 90 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ testé dans l'engrais minéral phosphaté, c'est-à-dire sans action (scénarios 1 et 9 sur les figures) ;
- les scénarios relatifs à une action de diminution des teneurs en Cd dans les engrais phosphatés jusqu'à 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ de façon constante ou dégressive dans la simulation (scénarios 8, 16, 18 et 20 sur les figures).

De plus, la diminution de la contamination considérée dans le modèle à la suite d'une réduction des teneurs en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés porte sur deux cultures : blé (grain) et pomme de terre, celle-ci étant répercutée sur les aliments à base de blé et pomme de terre. Les engrais minéraux phosphatés étant appliqués sur toutes cultures (et pas uniquement sur la pomme de terre et le blé modélisés ici), il est vraisemblable que les effets observés à la suite d'une action de réduction de la teneur en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés se répercuteront favorablement sur l'ensemble des productions végétales (consommation humaine et alimentation animale) exposées à ces intrants et par voie de conséquence sur l'exposition alimentaire du consommateur.

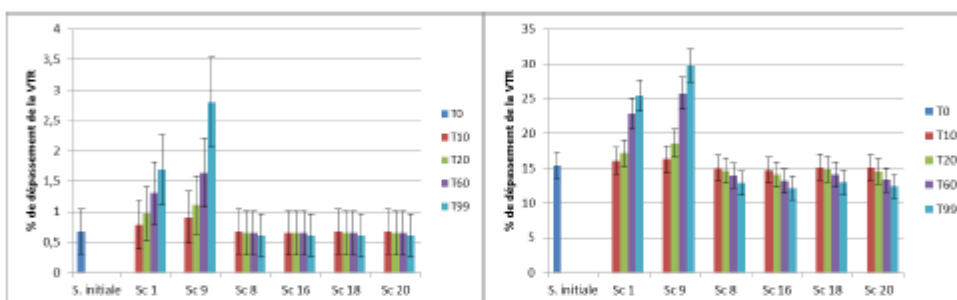


Figure 9. Pourcentage de dépassement de la VTR de 0,35 µg Cd.kg p.c⁻¹.j⁻¹ et intervalle de confiance à 95% (IC_{95%}) dans les différents scénarios, chez les adultes (à droite) et les enfants (à gauche), en LB.

S. initiale : expositions actuelles, présentées dans l'EAT2 (Anses, 2011a), avec la nouvelle VTR calculée dans cette saisine (0,35 µg Cd.kg p.c⁻¹.j⁻¹)

Sc 1 : scénario lié à un itinéraire monoculture blé avec apport d'engrais minéral phosphaté avec une concentration en Cd de 90 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ constante au cours de la simulation

Sc 9 : scénario lié à un itinéraire rotation pomme de terre/blé/blé avec apport d'engrais minéral phosphaté avec une concentration en Cd de 90 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ constante au cours de la simulation

Sc 8 : scénario lié à un itinéraire monoculture blé avec apport d'engrais minéral phosphaté avec une concentration en Cd de 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ constante au cours de la simulation

Sc 16 : scénario lié à un itinéraire rotation pomme de terre/blé/blé avec apport d'engrais minéral phosphaté avec une concentration en Cd de 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ constante au cours de la simulation

Sc 18 : scénario lié à un itinéraire monoculture blé avec apport d'engrais minéral phosphaté avec une concentration en Cd dégressives (60 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹)

Sc 20 : scénario lié à un itinéraire rotation pomme de terre/blé/blé avec apport d'engrais minéral phosphaté avec une concentration en Cd dégressives (60 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹)

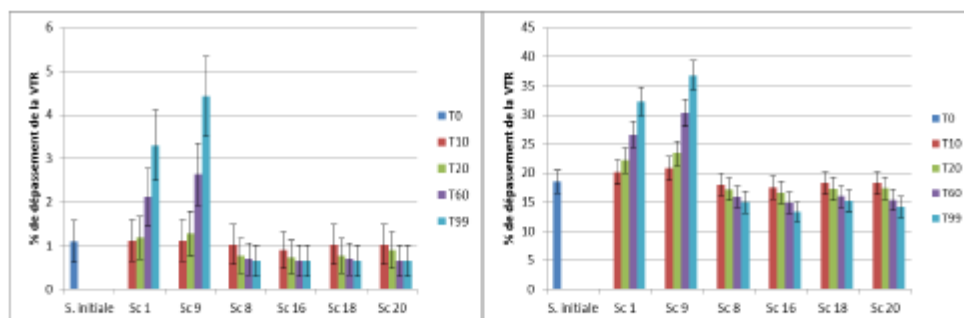


Figure 10. Pourcentage de dépassement de la VTR de 0,35 µg Cd.kg p.c⁻¹.j⁻¹ et intervalle de confiance à 95% (IC_{95%}) dans les différents scénarios, chez les adultes (à droite) et les enfants (à gauche), en UB.

S. Initiale : expositions actuelles, présentées dans l'EAT2 (Anses, 2011a), avec la nouvelle VTR calculée dans cette saisine (0,35 µg Cd.kg p.c⁻¹.j⁻¹)

Sc 1 : scénario lié à un itinéraire monoculture blé avec apport d'engrais minéral phosphaté avec une concentration en Cd de 90 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ constante au cours de la simulation

Sc 9 : scénario lié à un itinéraire rotation pomme de terre/blé/blé avec apport d'engrais minéral phosphaté avec une concentration en Cd de 90 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ constante au cours de la simulation

Sc 8 : scénario lié à un itinéraire monoculture blé avec apport d'engrais minéral phosphaté avec une concentration en Cd de 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ constante au cours de la simulation

Sc 16 : scénario lié à un itinéraire rotation pomme de terre/blé/blé avec apport d'engrais minéral phosphaté avec une concentration en Cd de 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ constante au cours de la simulation

Sc 18 : scénario lié à un itinéraire monoculture blé avec apport d'engrais minéral phosphaté avec une concentration en Cd dégressives (60 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹)

Sc 20 : scénario lié à un itinéraire rotation pomme de terre/blé/blé avec apport d'engrais minéral phosphaté avec une concentration en Cd dégressives (60 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹)

Les observations faites au regard de la sécurité du consommateur corroborent l'intérêt de mettre en œuvre des leviers d'action pour diminuer la concentration de cadmium à la source dans les intrants agricoles.

Les apports en cadmium dans les sols agricoles par les engrais minéraux phosphatés peuvent potentiellement être régulés à la source, par le choix de sources de phosphates naturellement pauvres en cadmium ou par la mise en œuvre des techniques de décadmiation. Les matières fertilisantes d'origine organique (boues de STEP, effluents d'élevage, etc.) constituent des sources de cadmium dont la concentration est liée à une contamination environnementale généralisée et ubiquitaire (alimentation animale, rejets domestiques, rejets industriels, transports, retombées atmosphériques...). Même si les concentrations de ces matières fertilisantes sont plus difficiles à réguler, il est nécessaire pour assurer la sécurité sanitaire des aliments de prendre en compte et de réduire les flux de cadmium qu'elles sont susceptibles d'apporter dans les sols.

Les résultats des modélisations des transferts du cadmium issues des itinéraires de fertilisation liés à l'emploi d'engrais minéraux phosphatés ont été comparées avec celles liées à des flux entrants sur les sols avec des fertilisants d'origine organique, afin de d'étudier de façon plus complète les phénomènes d'accumulation et de transfert du cadmium dans les divers compartiments. Les flux associés à l'emploi des engrais minéraux phosphatés testés dans le modèle (allant de 0,67 à 9 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹) (tableau 4) ont été calculés, ainsi que les flux liés à l'emploi de fertilisants d'origine organique susceptibles d'être utilisés : digestats de méthanisation à la ferme, boues de STEP et fumiers bovins (variant de 1,75 à 7,5 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹, tableau 5) pour lesquels des données sont disponibles. Afin d'analyser de façon plus complète le cadmium apporté par les matières fertilisantes et de dériver *in fine* les niveaux limites en cadmium dans les matières fertilisantes d'origine organique, le bilan massique des flux entrants a été évalué par le modèle (l'utilisation du modèle s'appuie sur une construction

pour traiter l'apport en cadmium par tout type d'intrant en considérant que les données d'entrée du modèle correspondent à des flux d'apports en cadmium par les intrants). Il est constaté que les apports de cadmium aux sols par les épandages de fertilisants d'origine organique ne sont pas liés à une forte concentration en Cd des matières mais essentiellement à la quantité épandue (tableau 5). Au regard des résultats dans les matrices sol-grain de blé-lixiviation simulés sur un temps de projection de 99 ans à partir des données d'entrées en flux des fertilisants d'origine organique et engrais minéraux phosphatés dans le modèle mathématique en s'appuyant sur un itinéraire monoculture blé, il est observé à la suite de la comparaison de flux une diminution de l'accumulation du cadmium dans le sol et de son transfert vers le grain de blé à la suite d'un flux annuel testé compris entre 0,67 et 1,75 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹. Ces flux sont représentatifs des scénarios actuels utilisant les digestats de méthanisation à la ferme avec une concentration moyenne en cadmium de 0,7 mg.kg⁻¹MS et avec les fertilisants phosphatés présentant une teneur en cadmium de 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ (il est observé pour les scénarios utilisant des fertilisants d'origine organique qu'à partir d'un flux de 2,55 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹ (fumiers de bovin), il y a une accumulation du Cd dans les sols et un transfert du Cd vers les grains de blé, et ce d'autant plus que le flux croît).

La comparaison des résultats de modélisation des fertilisations par les engrais minéraux phosphatés d'une part et par les fertilisants d'origine organique d'autre part montre que, quelle que soit la nature du fertilisant, un flux d'apport en cadmium, inférieur à 2 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹ permet de garantir une meilleure protection sanitaire.

- **Analyse des résultats au regard des caractéristiques des sols récepteurs des intrants agricoles**

Cette analyse a été complétée par l'étude des effets des caractéristiques des sols sur le transfert du Cd.

Par l'intermédiaire de l'analyse des caractéristiques de sols récepteurs, rendue possible par le modèle, il a été observé, à la suite de simulations d'épandage agricoles d'engrais minéraux phosphatés, un risque d'accumulation du cadmium en présence de sols agricoles déjà riches en Cd (pouvant être lié à sa composition et ses propriétés) et/ou présentant un pH élevé >7,5, ainsi qu'un risque de transfert du cadmium vers les cultures en présence de sols acides (pH <6,5). A l'exception des engrais minéraux phosphatés présentant une teneur égale ou inférieure à 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹, il est nécessaire de restreindre leurs utilisations en fonction de la typologie du sol agricole récepteur, notamment en présence :

- d'un sol riche en Cd (> 0,7 mg kg⁻¹) (cela représente 7,1% des sols agricoles liés aux cultures et prairies en France) ;
- d'un sol à pH < 6,5 (cela représente 50% des sols agricoles en France) ;
- et d'un sol à pH > 7,5 (cela représente 30% des sols agricoles en France).

Il est toutefois à noter que le cadmium s'immobilise par précipitation pour les sols basiques quelles que soient les teneurs en cadmium des engrais minéraux phosphatés.

Suite à une réduction des teneurs en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés, l'effet sur la phytodisponibilité du cadmium se distingue nettement sur les sols acides dans lesquels une diminution significative du transfert du cadmium est observée. Par conséquent, il est noté l'intérêt de réduire les concentrations en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés vis-à-vis particulièrement des sols acides qui favorisent la solubilité du cadmium et donc sa phytodisponibilité. Il est noté la possibilité d'augmenter le pH de ces sols acides par chaulage (ajout d'amendements basiques au sol) afin de limiter le transfert du cadmium vers les cultures. Une réserve est cependant émise sur ce point en fonction des apports en cadmium dans les sols : puisque le transfert du cadmium vers les cultures est limité par le chaulage, cela entraîne *in fine*, une accumulation de cadmium dans les sols. Or, le chaulage ne constitue pas une alternative durable pour éviter les transferts de cadmium aux aliments : en effet, il est important

de noter que de telles pratiques de chaulage, pour intéressantes qu'elles soient à court terme, représentent un danger à moyen et long terme, puisque rien ne garantit que l'augmentation de pH soit durable. *A contrario*, les processus édaphiques à l'œuvre dans le sol tendront à rétablir les équilibres physico-chimiques originels et à abaisser à nouveau le pH ce qui à terme peut favoriser les transferts du sol vers les cultures et les eaux de lixiviation.

Les apports phosphatés ont une incidence sur la phytodisponibilité du Cd en raison d'un changement du pH, d'une modification de la force osmotique de la solution de sol, d'une évolution de la disponibilité du Zn, d'une évolution de la matière organique du sol et de la chimie de la rhizosphère, d'un changement dans l'activité microbienne du sol et enfin d'un changement dans la croissance de la plante (Grant, 2011).

Au regard des caractéristiques des matières fertilisantes d'origine organique et des propriétés des sols, la phytodisponibilité du Cd peut être potentiellement réduite. En effet, l'apport de compost peut diminuer la phytodisponibilité du Cd car l'humification de la matière organique permet une plus forte affinité avec les métaux qui sont alors plus adsorbés. Le rapport Cd/Zn, s'il est fortement différent dans la matière épandue et dans les sols, pourrait impacter l'absorption du Cd du sol et donc avoir un impact sur sa phytodisponibilité. Certaines matières fertilisantes d'origine résiduaire (Mafor) peuvent avoir un effet acidifiant (boues digérées) ou chaulant (composts et boues chaulées). Lors du chaulage, la mobilité du Cd est réduite. Les boues, les composts et les fumiers présentent de fortes teneurs en matières organiques solides et ont des capacités d'échanges cationiques importantes. Ces Mafor ont donc des phases solides sorbantes qui limitent le transfert des éléments-trace métalliques (ETM). Les Mafor avec une faible concentration d'ETM cationique (dont le Cd fait partie) et une forte capacité de sorption limitent les ETM dans la solution de sol et donc les transferts dans les végétaux et les eaux de lixiviation. Ce point peut expliquer une baisse de transfert sol-plante des ETM cationiques suite à un épandage de fumier ou de compost. Ces constatations, liées à la compartimentation et/ou spéciation du Cd dans les sols et les Mafor, n'ont pas pu être prises en compte dans la modélisation faute de jeux de données exploitables actuellement disponibles. Une nouvelle fois, pour utile qu'elles puissent apparaître à court terme, il convient de ne pas négliger les dangers que peuvent représenter ces pratiques à moyen et long terme : le fonctionnement normal du sol conduira, à terme, à la minéralisation des matières organiques et au relargage des cations métalliques qu'elles auront temporairement adsorbés, induisant de fait des transferts et des risques accrus pour la sécurité sanitaire des aliments et l'environnement.

Le travail réalisé dans le cadre de la saisine a permis la modélisation de l'évolution temporelle des concentrations en cadmium en fonction de différents scénarios d'apports de matières fertilisantes. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de réduire de manière significative les concentrations et les transferts de cadmium dans les différentes matrices concernées (sols, tissus végétaux, eaux de lixiviation) si les flux entrants sont contrôlés de manière rigoureuse. Il importe ainsi de noter que, y compris, dans le cas où les apports de matières fertilisantes ne se traduisent pas par des transferts accrus de cadmium, en raison de l'apport de matière organique ou grâce au recours au chaulage, cela n'exclut pas un risque de transfert à moyen et/ou long terme vers les cultures ou les eaux continentales. En effet, s'il est possible de piéger à court terme les éléments métalliques dans le sol par des pratiques appropriées (chaulage, apport de matière organique...), il n'y a aucune garantie que cette adsorption perdure sur le long terme sauf intervention humaine répétée.

En effet, les sols sont le résultat de processus pédogénétiques se manifestant sur des durées longues, voire très longues au regard de leur mise en valeur agricole. De ce fait, les caractéristiques physico-chimiques premières d'un sol reflètent les équilibres dynamiques qui se sont mis en place au cours du temps avec la roche-mère sous l'effet du climat et des activités biologiques et microbiologiques. S'il est bien sûr possible de déplacer ces équilibres pour augmenter la capacité du sol à adsorber les polluants, il convient de garder à l'esprit que les processus naturels à l'œuvre dans le sol tendront à restaurer les équilibres initiaux, avec pour conséquence possible de rétablir à terme une forte disponibilité des polluants et donc de favoriser leurs transferts vers les eaux continentales ou les cultures. Le chaulage et/ou l'apport de matière organique sont donc des méthodes qui peuvent se révéler utiles à un instant donné

mais qui ne doivent pas faire oublier que leurs résultats en termes d'adsorption des polluants dans le complexe argilo-humique du sol ne sont pas durables sauf à intervenir de manière régulière.

L'augmentation de la charge en cadmium des sols agricoles sous l'effet des apports d'engrais minéraux phosphatés et de matières fertilisantes d'origine organique et/ou d'origine résiduaire augmente les risques de transfert de cet élément dans l'alimentation et les eaux destinées à la consommation humaine. Il est considéré de façon collégiale que ce risque doit être pris en compte dans la réglementation afin d'en maîtriser l'impact.

➤ Traitement des incertitudes

Au cours de la méthodologie, une liste d'incertitudes a été identifiée et traitée comme le montre le tableau 1. En l'occurrence, l'identification des sources d'incertitudes s'appuie sur une typologie composée principalement des classes suivantes :

- sources d'incertitude liées au corpus de connaissances, incluant celles liées à la variabilité (intrinsèque et liée à l'hétérogénéité) des caractéristiques d'intérêt, au regard de l'état des connaissances, de la méthode de collecte de données et des modèles existants ;
- sources d'incertitude liées à la méthode d'évaluation, au regard des données sélectionnées, des méthodes d'intégration des données et de l'interprétation des résultats ;
- sources d'incertitude liées à la communication des résultats au regard de la présentation des résultats et de l'expression des résultats.

Certaines incertitudes liées aux données et modèles ont été identifiées et parfois intégrées dans le modèle. Les incertitudes suivantes ont notamment été identifiées au cours de ce travail :

▪ Les doses d'apport

Il existe une grande variabilité des pratiques de fertilisation. Afin de prendre en compte l'incertitude liée aux pratiques, plusieurs itinéraires de fertilisation ont été étudiés. Il a été décidé de considérer dans la modélisation les itinéraires de fertilisation les plus susceptibles de contribuer à l'apport en cadmium dans des sols agricoles pauvrement pourvus en phosphore par rapport aux exigences des plantes, sur la base des préconisations agronomiques recommandées par Arvalis-Institut du Végétal et le Comifer. Le processus d'évaluation s'appuie ainsi sur une situation maximaliste, c'est-à-dire nécessitant le plus d'apport en engrais phosphatés.

La variabilité liée aux caractéristiques des sols en France, aux pratiques agricoles et les incertitudes associées ont été prises en compte sans distinction en utilisant des distributions (empiriques ou paramétriques) de probabilités pour les paramètres du modèle correspondants (fonds géochimique, densité du sol, taux de carbone, matières organiques et argile du sol, pH sol, dépôts atmosphérique, précipitations annuelles, rendements et quantité d'eau d'irrigation).

▪ Les cultures

Les itinéraires de fertilisation retenus dans le cadre de l'évaluation s'appuient sur des orientations agronomiques liées à deux cultures seulement : le blé et la pomme de terre. Ces deux cultures ont été identifiées à l'origine des aliments contributeurs majeurs de l'exposition des consommateurs au cadmium (Anses, 2011a). Toutefois, les matières fertilisantes peuvent être utilisées pour tous types de cultures et cela n'a pas pu être traité.

- Influence de la variété végétale, du stade de développement, de l'activité biologique et des processus de régulation physiologique sur l'absorption en éléments inorganiques

Ces processus n'ont pas pu être intégrés dans l'évaluation au regard de l'absence d'informations pertinentes et de la multiplicité et de la complexité des paramètres à prendre en compte.

- La spéciation

La spéciation chimique d'un élément inorganique fait référence à sa forme chimique (liaisons chimiques de l'élément étudié avec d'autres éléments ou ligands, et aussi du degré d'oxydation). Les études de spéciation chimique ont généralement pour objectif de déterminer les formes chimiques d'un élément étudié dans une matrice (sol, eau, sédiment et plante) et éventuellement de réaliser la quantification relative de ces formes.

Cependant, les études de spéciation sur le terrain dans les écosystèmes complexes restent rares car celles-ci sont coûteuses et longues. De plus, la spéciation chimique d'un élément peut évoluer dans le sol sous l'influence de l'activité biologique, des variations de pH, etc. D'une façon opérationnelle, c'est la compartimentation des éléments qui est beaucoup plus fréquemment étudiée.

Dans ce travail, les données de terrain utilisées pour bâtir le modèle prédictif présentent l'intérêt de refléter la réalité des pratiques et de représenter des scénarios réalistes de cultures. Pour ces études de terrain, les données de spéciation chimique sont rares et il est principalement question de compartimentation du phosphore et du cadmium.

Bien que la spéciation chimique des éléments inorganiques influe sur leur réactivité, biodisponibilité et (éco)toxicité, en raison du peu de données disponibles sur ce sujet dans le cadre des études de terrain utilisables pour la modélisation, il n'a pas été possible d'intégrer ce paramètre.

- Variabilité des concentrations en cadmium des matières fertilisantes d'origine organique

Les matières fertilisantes d'origine organique des sols constituent un compartiment particulièrement hétérogène, réactif (exemples : adsorption des métaux, formation de résidus liés avec les polluants organiques, formation du complexe argilo-humique) et dynamique (sous l'effet de l'activité biologique, elles peuvent se fragmenter, se transformer, être minéralisées). Bien que les matières fertilisantes d'origine organique des sols fraîches et/ou évoluées aient été étudiées depuis des décennies, leur complexité intrinsèque rend difficile l'entreprise d'une modélisation précise entre les caractéristiques des matières organiques et leur réactivité.

En raison de cette forte complexité des matières fertilisantes d'origine organique fraîches utilisées comme engrais et amendements, et de leur évolution une fois épandues et incorporées aux sols, les données scientifiques actuellement disponibles sont insuffisantes pour réaliser un travail de modélisation identique à celui effectué pour les engrais minéraux phosphatés commerciaux. Cependant, il a été choisi d'aborder dans la modélisation le sujet des matières fertilisantes d'origine organique épandues aux sols, car elles participent au flux de cadmium. Celles-ci ne doivent donc pas être écartées.

- Simulation des concentrations au cours du temps

L'incertitude liée à la combinaison de plusieurs sources de données indépendantes (caractéristiques des sols, quantité d'eau d'irrigation et d'eau de pluie, rendement des cultures) a été prise en compte par le biais des simulations. Un grand nombre de simulations étant réalisées (10 000), l'ensemble des combinaisons possibles a été balayé et permet de traiter de nombreux cas possibles. Cela peut en revanche engendrer des combinaisons non réalistes comme une quantité d'eau d'arrosage importante pour des sols présents dans des régions déjà pluvieuses. Le pourcentage de scénarios non réalistes et leur impact sur la concentration en cadmium n'a pas été testé.

- Les équations de transfert sol-cultures

Le transfert du Cd du sol à la végétation dépend des caractéristiques du sol (pH, teneur en argiles, teneur en matière organique, capacité d'échange cationique...), et des pratiques agronomiques décrites dans la méthode d'évaluation et nécessitant l'intégration d'équations de transfert sol-plante. Le choix des modèles de transfert du cadmium du sol vers les plantes (blé dur, blé tendre et pomme de terre) a été fait à la lecture de la littérature scientifique (Ran *et al.*, 2016 ; Franz *et al.*, 2008), sur la base des critères suivants : la contamination du sol en cadmium n'était pas issue d'activités industrielles et les paramètres de l'équation peuvent être renseignés par les données du RMQS (GIS Sol).

L'équation de transfert retenue pour le transfert du sol vers la culture blé (Ran *et al.* ; 2016) ne fait pas la distinction entre le blé dur et le blé tendre et ne tient donc pas compte de l'effet de l'espèce végétale.

Par ailleurs, Grant *et al.*, (2002) estiment que l'augmentation de la concentration en Cd des grains de blé dur n'est pas en lien avec l'augmentation du Cd dans les engrais phosphatés (les concentrations en Cd dans les engrais phosphatés expérimentés étaient comprises entre 0,2 et 186 µg.g⁻¹). Selon leur recherche menée sur 3 ans, la baisse de la concentration du Cd dans les fertilisants n'aurait pas d'incidence sur la concentration dans le grain l'année de l'application. Par contre, la baisse de la concentration de Cd dans les engrais minéraux phosphatés a un effet sur la diminution de la quantité de Cd dans le sol agricole.

- Données d'entrée liées au calcul du transfert du cadmium par la lixiviation

Les données d'entrée liées à l'équation décrivant la lixiviation s'appuient sur le calcul de la concentration en cadmium dans la solution du sol, calcul effectué à partir des publications de De Vries *et al.*, (2011, 2013) qui ont trait à un environnement australien qui peut être différent de l'environnement français. L'incertitude liée aux paramètres définis dans l'équation n'a pas été prise en compte. Néanmoins, cela représente les seules données disponibles. L'étude de Sterckeman *et al.* (2018) confirme le manque de données sur la lixiviation dans les sols agricoles français et le besoin du développement de ces dernières. Les auteurs concluent que l'exactitude des bilans de masse pourrait être améliorée par une meilleure évaluation de la lixiviation au Cd. Cette publication met en évidence les conséquences sur le bilan massique des résultats calculés de la part de cadmium lixivié avec différents facteurs jouant sur le flux de sortie de cadmium lixivié et suivant six scénarios de pratiques agricoles en France.

- Ajustements de lois sur les données

Des distributions ont été déterminées à partir des informations disponibles (moyenne, centiles etc.). L'incertitude liée au choix du type de lois et à la détermination des paramètres n'a pas été traitée. Cela concerne plusieurs variables d'entrées du modèle : densité du sol, quantité et concentration d'eau d'irrigation des cultures blé et pomme de terre, rendement des cultures blé et pomme de terre.

- Données d'entrée du modèle « consommateur »

Le modèle estimant l'exposition du consommateur est basé sur les données de consommation de l'étude INCA2, qui comportent des incertitudes difficilement quantifiables liées à la représentativité de l'échantillon, l'estimation des consommations alimentaires (biais de déclaration, de mémorisation des déclarants, précision des outils de quantification, etc.), et du poids corporel (selon le cas du poids déclaré ou mesuré ou estimé). En particulier, le choix d'exclure les individus sous-déclarants pourrait conduire à surestimer les forts centiles de consommation et donc d'exposition, et donc le pourcentage de dépassement de la VTR. Ces choix sont néanmoins protecteurs dans une optique d'ERS.

Les données de contamination de l'EAT2 comportent des incertitudes liées notamment à la sélection des aliments, à la représentativité de l'échantillonnage, aux aspects métrologiques des laboratoires et au traitement de la censure. Les aliments sélectionnés dans l'EAT2 couvrent environ 90% de la consommation moyenne nationale des adultes et des enfants, ce qui conduit à une légère sous-estimation de l'exposition totale. Il est très difficile de qualifier les incertitudes liées à la représentativité de l'échantillonnage sachant que 15 sous-échantillons individuels sont combinés pour obtenir la concentration moyenne de l'aliment considéré. Le traitement et la présentation des résultats d'exposition par scénarios englobants, LB et UB, permet d'incorporer explicitement l'incertitude associée aux données censurées.

S'agissant de la concentration du cadmium dans la plante, sa distribution n'est pas constante. Or, dans le modèle « consommateur », il a été considéré, à défaut de facteurs de procédé, que l'impact d'une modification de teneur moyenne dans la plante (blé ou pomme de terre) entraînait la même modification de teneur dans l'aliment tel que consommé pour la pomme de terre, et dans l'ingrédient (farine, son de blé, etc.) pour les aliments à base de blé. Cette hypothèse de calcul a été retenue car considérée comme protectrice.

- Changement global des paramètres sur la durée de modélisation liée à un temps de projection sur 99 ans

Les paramètres d'entrées dans le modèle ont été considérés constants sur le temps de projection de 99 ans utilisé pour la modélisation. Ces paramètres font notamment référence :

- a. au climat,
- b. à la typologie des sols (pH, fond géochimique, matières organiques, argile etc.),
- c. aux pratiques agricoles,
- d. aux concentrations en cadmium évolutifs dans les intrants agricoles, plus particulièrement pour les fertilisants d'origine organique,
- e. aux données de consommation des aliments,
- f. aux données de contamination des aliments autres que la pomme de terre et les aliments à base de blé

Bien que ces paramètres évoluent dans le temps, la prédiction de leurs évolutions est difficile à intégrer dans la modélisation.

- Valeur toxicologique de référence par voie orale du cadmium

La valeur toxicologique de référence par ingestion du cadmium considérée dans cette évaluation a été construite à partir de données et d'une méthodologie présentant des facteurs d'incertitudes, notamment identifiés au préalable dans le rapport de la question 1 de la présente saisine. Les incertitudes liées à la construction de cette VTR n'ont pas été intégrées dans la présente évaluation.

- Difficultés de respecter les flux pour les amendements organiques liés à la difficulté de réguler à la source la teneur en cadmium
- Difficultés de diminuer les niveaux de contaminants des aliments et l'exposition alimentaire associée en raison du fait que le cadmium est un contaminant ubiquitaire (Anses, 2011b)

Résultat de l'expertise collective

Le comité d'experts spécialisé « Evaluation des risques physico-chimiques liés aux aliments » a adopté les travaux d'expertise collective ainsi que ses conclusions et recommandations, objets du présent rapport lors de sa séance du 20 juin 2018 et a fait part de cette adoption à la direction générale de l'Anses.

Conclusions de l'expertise collective

Les données et informations disponibles montrent, d'une part, qu'à ce jour, le risque sanitaire lié à la présence de cadmium dans les aliments ne peut être écarté et, d'autre part, que les pratiques actuelles en termes de matières fertilisantes conduisent à une augmentation des concentrations dans les sols et donc dans les denrées alimentaires.

La modélisation de l'évolution temporelle des concentrations en cadmium en fonction de différents scénarios d'apports de matières fertilisantes montre qu'il est possible de réduire de manière significative les concentrations en cadmium dans les sols et ses transferts vers les végétaux et eaux de lixiviation si les flux entrants sont contrôlés de manière rigoureuse. Cela entraînerait une diminution des expositions du consommateur au cadmium.

Dans le but de maîtriser la pollution des sols agricoles, la contamination des productions agricoles et par conséquent l'exposition alimentaire associée, il est recommandé que le flux annuel d'apport en cadmium n'excède pas 2 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹ quelles que soient la nature (engrais/amendement, origine organique/minérale...) et la quantité totale de matière(s) fertilisante(s) apportée(s) au sol agricole.

Une teneur en cadmium égale ou inférieure à 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans les produits de type engrais minéraux phosphatés pouvant être régulés à la source permet de ne pas dépasser ce flux annuel de 2 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹.

Par ailleurs, les résultats montrent qu'une teneur en cadmium inférieure à 1 mg Cd.kg⁻¹ de matière sèche dans les fertilisants d'origine organique permettrait de respecter ce flux. Au vu de la difficulté à maîtriser les concentrations en cadmium dans les fertilisants d'origine organique, la recommandation d'une teneur limite en cadmium dans ce type d'intrant peut conduire à limiter leur usage en valorisation agricole et favoriser leur réorientation vers d'autres voies d'élimination ou de valorisation (mise en décharge dans des centres de stockage, incinération, méthanisation, etc.) qui peuvent également constituer des sources de pollution qu'il convient de maîtriser.

Il est également recommandé que toute matière fertilisante soit renseignée sur sa teneur en cadmium avant épandage.

Par ailleurs, le fait de recourir à des pratiques agricoles pouvant piéger à court terme le cadmium, tel que le chaulage, l'apport de matières organiques ou encore des techniques de remédiation comme la phytostabilisation, ne constitue pas une solution durable. En effet, ces techniques ne permettent de piéger le cadmium que temporairement et, en fonction des apports en contaminant, ne garantissent pas que cette adsorption perdure à moyen et long terme sauf intervention humaine répétée. Elles ne peuvent donc pas se substituer à une politique active de réduction des apports de cadmium sur les sols agricoles.

Pour réduire les teneurs en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés, il peut être mis en œuvre des techniques de décadmiation. Actuellement, l'efficacité et le coût des procédés de décadmiation pour améliorer la qualité des engrais minéraux phosphatés ne sont pas encore optimisés. Il est recommandé le développement de la recherche afin d'optimiser et développer ces procédés. Il a également été constaté que les fertilisants d'origine organique sont assez peu étudiés et que leur composition en termes de contaminants est très variable. Il serait là aussi nécessaire de développer la recherche sur la caractérisation de ces intrants agronomiques.

Afin de réduire les incertitudes identifiées au cours de ce travail, il est noté le besoin de générer des données complémentaires, notamment sur des sujets liés à la phytodisponibilité, à la spéciation du cadmium, au transfert sol-plante-animal-denrées alimentaires d'origine animale,

etc. Des enquêtes auprès des agriculteurs et des vendeurs/producteurs de MFSC permettraient aussi d'améliorer la précision sur les quantités d'engrais phosphatés épandus.

Enfin, compte tenu de l'origine ubiquitaire du cadmium, il est recommandé de réduire autant que possible toutes les sources d'apport en cadmium (agricoles, industrielles, émissions atmosphériques...) afin de poursuivre l'abaissement de la contamination environnementale et *in fine* l'exposition du consommateur. Il est, par conséquent, constaté la nécessité d'une prise en compte globale de la problématique liée à la circulation générale du cadmium dans l'environnement.

Date de validation de la synthèse par le comité d'experts spécialisé : 20 juin 2018

Sigles et abréviations

AFSSA	Agence française de sécurité des aliments
ANSES	Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
AMM	Autorisation de Mise sur le Marché
Arvalis	Institut du végétal - institut technique au service des agriculteurs et des filières
ATSDR	Agency for Toxic Substances and Disease Registry
BMD	Benchmark dose
Cd	Cadmium
CES	Comité d'experts spécialisés
CIRC	Centre International de la Recherche sur le Cancer
CMR	Cancérogène, Mutagène, Reprotoxique
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
Comifer	Comité Français d'Étude et de Développement de la Fertilisation
CPGN	Concentration Pédo-Géochimique Naturelle
CSTEE	Comité scientifique sur la toxicité, l'écotoxicité et l'environnement
DAP	Phosphate de diammonium
FPGN	Fond Pédo-Géochimique Naturel
DGAL	Direction générale de l'alimentation
DGCCRF	Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes
DGS	Direction Générale de la Santé
DGPR	Direction Générale de la Prévention des Risques
DGT	Direction Générale du Travail
DHT	Dose Hebdomadaire Tolérable
DJT	Dose Journalière Tolérable
EAT	Etude Alimentation Totale
EATi	Etude Alimentation Totale infantile
EFSA	European Food Safety Authority
E(Q)RS	Evaluation (Quantitative) de Risques Sanitaires
ETM	Élément Trace Métallique
GIS SOL	Groupement d'Intérêt Scientifique Sol

INRA	Institut National de la Recherche Agronomique
IRSTEA	Institut Nationale de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture
IRTAC	Institut de recherches technologiques agroalimentaires des céréales
JECFA	Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives
KEMI	Swedish chemicals Agency
MAP	Phosphate de monoamunium
Mafor	Matières fertilisantes d'origine résiduaire
MFSC	Matières Fertilisantes et Supports de Culture
MOS	Matières organiques des sols
NO(A)EL	No Observed (Adverse) Effect Level (= Dose maximale n'entraînant pas d'effet néfaste observé)
P	Phosphore
P ₂ O ₅	Anhydride phosphorique
PN	Phosphate naturel
P95	95ème percentile
RMQS	Réseau de Mesure de la Qualité des Sols
SCHER	Scientific Committee on Health and Environmental Risks, comité scientifique rattachée à la Comission Européenne
TAH	Teneurs Agricoles Habituelles
UE	Union Européenne
VTR	Valeur Toxicologique de Référence

Liste des tableaux

Tableau 1. Informations relatives aux teneurs limites (mg.kg ⁻¹ MS) en éléments traces métalliques et micropolluants organiques dans les boues de STEP, matières fertilisantes et supports de culture commercialisés	66
Tableau 2. Informations relatives aux flux maximaux annuels (moyens sur 10 ans) (g.ha ⁻¹) en éléments traces métalliques et composés traces organiques pour l'homologation des matières fertilisantes	67
Tableau 3. Concentration en cadmium (mg.kg ⁻¹) dans différentes roches sédimentaires ou ignées (Source : Roberts, 2014)	69
Tableau 4. Principaux engrais phosphatés obtenus par traitement du phosphate naturel (PN).....	71
Tableau 5. Distribution des concentrations en cadmium dans 196 engrais analysés, exprimés par rapport à l'engrais ou au contenu en phosphore (P) ou anhydride phosphorique (P ₂ O ₅).....	72
Tableau 6. Concentrations en cadmium dans les catégories d'engrais (mg.kg ⁻¹ MS).....	72

Tableau 7. Concentration en cadmium des effluents d'élevage (mg.kg ⁻¹ MS).....	74
Tableau 8. Concentration en cadmium des amendements basiques Ca et Mg (mg.kg ⁻¹ MS).....	74
Tableau 9. Teneurs en cadmium dans les boues de STEP et les composts (mg.kg ⁻¹ MS).....	74
Tableau 10. Teneurs en cadmium des digestats d'origine agricole et des matières végétales (mg.kg ⁻¹ MS)	75
Tableau 11. Flux annuels moyen, minimum et maximum de cadmium apportés aux sols agricoles selon différentes sources.....	76
Tableau 12. Méthode de raisonnement de l'évaluation de biodisponibilité du phosphore – Valeurs seuils de phosphore extraites du sol (L1 et L2, L1 < L2) pour déterminer une classe de biodisponibilité du phosphore du sol, dépendant des méthodes analytiques (Olsen, Joret-Hébert, Dyer) et des caractéristiques du sol : CaCO ₃ , pH, argile et carbone organique (Source : Denoroy <i>et al.</i> , 2004).....	79
Tableau 13. Grille de calcul des doses de phosphore à apporter établie par le Comifer	81
Tableau 14. Description de bases de données disponibles concernant les concentrations en ETM dans les sols.....	92
Tableau 15. Statistiques descriptives pour le cadmium des populations de sols échantillonnées dans les bases de données.....	93
Tableau 16. Apports conseillés, en fonction de l'objectif de rendement des cultures, de la nature des sols et du passé de fertilisation	96
Tableau 17. Apports moyens sur les sols agricoles en France et dans d'autres pays (FR : France, GB : Grande-Bretagne, CH : Confédération Helvétique, PB : Pays-Bas, Ch : Chine, A : Allemagne) d'après [Belon <i>et al.</i> , 2012]	97
Tableau 18. Valeurs de cadmium mesurées dans les parties comestibles des différentes cultures (sources : Shahid <i>et al.</i> , 2017a et base de données BAPPET).....	104
Tableau 19. Paramètres d'entrée intégrés dans la construction du modèle probabiliste lié à la phase matière fertilisante-sol-plante du modèle, valeurs et équations relatives au flux entrant en cadmium et flux sortant en cadmium de l'approche « mass-balance » sur lesquels le modèle s'appuie et inclut l'intégration de la variabilité et le traitement de l'incertitude	113
Tableau 20: Hypothèses de seuils de concentrations en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés testés dans le modèle probabiliste	119
Tableau 21. Comparaison entre les concentrations en cadmium (exprimées en mg Cd. kg ⁻¹ de partie comestible de la plante) calculées avec le modèle mathématique de la saisine avec celles précédemment prédites par Römkens <i>et al.</i> (2017) ou mesurées dans les grains de blé et pomme de terre au niveau français par les plans de surveillance et de contrôle (PS/PC) (années 2010 à 2015) et au niveau européen (Efsa, 2009)	129
Tableau 22. Description de l'exposition au cadmium de la population – situation initiale.....	145
Tableau 23. Description de l'exposition au cadmium de la population adulte – scénarios 8, 16, 18, 20, 1 et 9, situation initiale	147
Tableau 24. Description de l'exposition au cadmium de la population enfant – scénarios 8, 16, 18, 20, 1 et 9, situation initiale	148
Tableau 25. Flux liés aux apports de fertilisants phosphatés résultant des scénarios d'itinéraire de fertilisation testés dans le modèle.....	153
Tableau 26. Flux liés aux apports de fertilisants d'origine organique testés dans le modèle	154

Liste des figures

Figure 1. Part des différentes sources de contamination des quantités totales de métaux et métalloïdes entrant sur les sols agricoles français (source : Ademe-Sogreah, 2007, 2012).....	68
Figure 2. Apport au sol du cadmium en France sur les sols agricoles (source Belon <i>et al.</i> , 2012)	75
Figure 3. Cartogramme pour les trois classes de teneur en phosphore assimilable pour les sols agricoles (cultures et prairies) (source : © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017)	80
Figure 4. Principaux facteurs influençant : (a) la qualité d'un engrais phosphaté industrialisé, (b) ainsi que la contamination des végétaux et <i>in fine</i> (c) l'exposition humaine au cadmium dans un contexte d'utilisation des engrais phosphatés industrialisés présentant des traces de cadmium	83
Figure 5. Transfert du cadmium depuis les sources environnementales jusqu'au consommateur	90
Figure 6. Cartogramme des classes de teneurs en cadmium en considérant les points de prélèvement RMQS agricoles (cultures et prairies) (source : © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017)	94
Figure 7. Cartogramme des types de pH sur les points de prélèvement RMQS agricoles (cultures et prairies) (source : © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017)	95
Figure 8. Localisation (spéciation) des éléments en traces métalliques dans le sol (source : ADEME/APCA. (2005).....	102
Figure 9. Résumé schématique des sources de cadmium, son absorption par les plantes, ses effets sur la croissance des plantes et la santé humaine	108
Figure 10. Aperçu schématique de la modélisation du transfert du cadmium depuis l'apport en cadmium dans les sols agricoles par les matières fertilisantes jusqu'au consommateur par l'intermédiaire des productions végétales	109
Figure 11. Représentation schématique de la modélisation mise en œuvre dans le but de proposer des valeurs limites en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de maîtriser la pollution en cadmium des sols agricoles, la contamination en cadmium des cultures et l'exposition du consommateur au cadmium.....	110
Figure 12. Approche schématique de la modélisation mathématique	112
Figure 13. Représentation schématique de l'interprétation des résultats des pourcentages de variations identifiés pour les matrices sol-culture-lixiviats issus de la modélisation par rapport à la première année de référence sous forme de boxplots	127
Figure 14. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, de l'accumulation du cadmium dans le sol en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 80 kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹ et des teneurs en cadmium constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP ₂ O ₅ ⁻¹)	131
Figure 15. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, de l'accumulation du cadmium dans le sol en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 100 kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹ suivi de 2 années d'impasse et des teneurs en cadmium constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP ₂ O ₅ ⁻¹).....	132
Figure 16. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, de l'accumulation du cadmium dans le sol en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation d'une monoculture de blé à 80 kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹ et des teneurs en cadmium	

dégressives au cours de la simulation dans l'engrais phosphaté (60 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹ pendant 3 ans, puis 40 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹ pendant 12 ans et 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹ jusqu'à 99 ans)..... 133

Figure 17. Variation de la concentration en cadmium dans les sols, en fonction de leur pH (acide, neutre ou basique) et de la concentration en cadmium des engrais minéraux phosphatés épandus (respectivement 90, 60, 40 et 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹) pour un itinéraire de fertilisation correspondant à une monoculture de blé à 80 kg P₂O₅. ha⁻¹an⁻¹ 134

Figure 18. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, du transfert du cadmium vers le blé (grain) en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 80 kg P₂O₅.ha⁻¹an⁻¹ et des teneurs en cadmium constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹) 136

Figure 19. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, du transfert du cadmium vers le blé (grain) en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 100 kg P₂O₅.ha⁻¹an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et des teneurs en cadmium constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹) 137

Figure 20. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, du transfert du cadmium vers le blé (grain) et la pomme de terre en fonction du temps de projection (10, 11, 20, 22, 60, 61, 97, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation rotation 180 kg P₂O₅.ha⁻¹an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et des teneurs en cadmium constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹) 138

Figure 21. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, du transfert du cadmium vers l'eau lixiviée en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 80 kg P₂O₅.ha⁻¹an⁻¹ et des teneurs en cadmium constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹) 140

Figure 22. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, du transfert du cadmium vers l'eau lixiviée en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 100 kg.ha⁻¹an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et des teneurs en cadmium constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)..... 141

Figure 23. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, du transfert du cadmium vers l'eau lixiviée en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation en rotation de 180 kg.ha⁻¹an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et des teneurs en cadmium constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)..... 142

Figure 24. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, du transfert du cadmium vers l'eau lixiviée en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation en rotation de 100 kg.ha⁻¹an⁻¹ et des teneurs en cadmium constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹) 143

Figure 25. Pourcentage de dépassement de la VTR de 0,35 µg Cd.kg p.c⁻¹.j⁻¹ et intervalle de confiance à 95% (IC_{95%}) dans les différents scénarios, chez les adultes, en LB 150

Figure 26. Pourcentage de dépassement de la VTR de 0,35 µg Cd.kg p.c⁻¹.j⁻¹ et intervalle de confiance à 95% (IC_{95%}) dans les différents scénarios, chez les adultes, en UB 150

Figure 27. Pourcentage de dépassement de la VTR de 0,35 µg Cd.kg p.c⁻¹.j⁻¹ et intervalle de confiance à 95% (IC_{95%}) dans les différents scénarios, chez les enfants, en LB..... 151

Figure 28. Pourcentage de dépassement de la VTR de 0,35 $\mu\text{g Cd.kg p.c}^{-1}.\text{j}^{-1}$ et intervalle de confiance à 95% (IC _{95%}) dans les différents scénarios, chez les enfants, en UB	151
Figure 29. Variations (%) des teneurs moyennes et au décile 90 en cadmium des sols en fonction du flux d'apport des matières fertilisantes selon un itinéraire en monoculture blé.....	155
Figure 30. Variations (%) des teneurs moyennes et au décile 90 en Cd dans le grain de blé en fonction du flux d'apport des matières fertilisantes selon un itinéraire en monoculture blé	156
Figure 31. Variations (%) des teneurs moyennes et au décile 90 en Cd des lixiviats en fonction du flux d'apport des matières fertilisantes selon un itinéraire en monoculture blé.....	157
Figure 32. Exposition humaine au cadmium - Depuis ses sources dans l'environnement, dont la filière des matières fertilisantes, jusqu'à l'exposition du consommateur au regard de sa toxicologie	177

1 Contexte, objet et modalités de réalisation de l'expertise

1.1 Contexte

Le cadmium (Cd) est un métal de transition ubiquitaire qui se retrouve dans les différents compartiments de l'environnement (sols, eau et air) du fait de sa présence à l'état naturel dans la croûte terrestre et des apports anthropiques liés aux activités industrielles et aux pratiques agricoles. Le cadmium pénètre dans les végétaux généralement par leurs racines, mais également parfois par leurs parties aériennes (cette voie peut en particulier être significative pour certains végétaux tels que les salades qui développent des surfaces foliaires importantes et dans le cas de certaines zones urbaines et industrielles caractérisées par de fortes densités en particules fines (Shahid *et al.*, 2017b)) et entre ainsi dans la chaîne alimentaire.

Le cadmium a été classé « cancérigène pour l'Homme » (groupe 1) par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) en 2012 et classé dans la catégorie 2¹ par l'Union européenne en 2004 (JOCE, 2004).

Par ailleurs, le cadmium est connu pour induire chez l'Homme une atteinte tubulaire rénale et des pathologies osseuses suite à une exposition prolongée par voie orale. Des troubles de la reproduction ont également été rapportés (Anses, 2011 a et b).

1.2 Objet de la saisine

L'Anses a été saisie le 22 juin 2015 par la Direction générale de la santé (DGS), la Direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes (DGCCRF), la Direction générale du travail (DGT), la Direction générale de l'alimentation (DGAI) et la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) sur la problématique suivante :

Exposition au cadmium – Propositions de valeurs toxicologiques de référence (VTR) par ingestion, de valeurs sanitaires repères dans les milieux biologiques (sang, urine...) et de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes et supports de culture permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles et la contamination des productions végétales consommées par l'Homme.

L'Anses est interrogée pour se prononcer sur les questions suivantes :

1. Pour les populations riveraines de sites pollués susceptibles d'être surexposées au cadmium :
 - a. Quelles valeurs toxicologiques de référence par ingestion (adultes, enfants...) faut-il retenir dans le cadre de la réalisation des évaluations quantitatives des risques sanitaires ?

¹ Correspondant à la catégorie 1B actuelle définie par le règlement (CE) N°1272/2008 : substance présumée cancérigène chez l'être humain

- b. Quelles valeurs sanitaires repères du cadmium faut-il retenir dans les milieux biologiques (sang, urines...), selon l'âge, dans le cadre d'une prise en charge sanitaire ?
 2. Pour les populations de travailleurs en contact avec des matières fertilisantes, des produits ou procédés impliquant du cadmium, ou intervenant sur des sites pollués, et à la lumière des informations qui pourraient être obtenues dans le cadre de la saisine adressée à l'InVS (Institut National de Veille Sanitaire devenu depuis le 1^{er} mai 2016 l'Agence Nationale de Santé Publique) :
 - a. Les risques liés à l'exposition au cadmium dans ces contextes professionnels sont-ils bien évalués au titre des réglementations santé et sécurité au travail (à l'aide d'une enquête de filière par exemple) ?
 - b. Quels sont les niveaux de contamination qui pourraient être estimés selon les activités ou situations professionnelles ?
 - c. Quelles conclusions peuvent en être tirées en comparaison des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) et des valeurs limites biologiques (notamment celles recommandées par l'Anses) ?
 3. Dans l'ensemble des matières fertilisantes et supports de culture, quels seraient les niveaux en cadmium permettant, en prenant en compte les travaux européens et la spécificité de ces produits, de maîtriser la pollution des sols agricoles et la contamination des productions végétales ?

1.3 Modalités de traitement : moyens mis en œuvre et organisation

L'Anses a confié au comité d'experts spécialisé (CES) « Caractérisation des dangers des substances et valeurs toxicologiques de référence » (CES Substances) l'instruction de cette saisine jusqu'en août 2017, puis au CES « Valeurs sanitaires de référence » (CES VSR).

Des experts rapporteurs ont été nommés pour débattre spécifiquement de chacune des trois questions de la saisine.

Les travaux d'expertise des rapporteurs ont été régulièrement soumis aux CES (tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques).

Concernant la troisième question qui fait l'objet de ce rapport, les travaux des experts nommés ont fait l'objet d'une présentation devant les comités d'experts spécialisés (CES) « Evaluation des risques physico-chimiques liés aux aliments » (CES ERCA), « Caractérisation des dangers des substances et valeurs toxicologiques de référence » (CES Substances) jusqu'au 30 juin 2017 puis « Valeurs sanitaires de référence » (CES VSR) et « Matières Fertilisantes et Supports de Culture » (CES MFSC). Les travaux liés à cette question ont fait l'objet d'une validation le 20 juin 2018 par le CES ERCA et ont été présentés au CES VSR le 22 juin 2018.

Ces travaux sont ainsi issus d'un collectif d'experts aux compétences complémentaires.

L'expertise a été réalisée dans le respect de la norme NF X 50-110 « Qualité en expertise – prescriptions générales de compétence pour une expertise (mai 2003) ».

1.4 Prévention des risques de conflits d'intérêts.

L'Anses analyse les liens d'intérêts déclarés par les experts avant leur nomination et tout au long des travaux, afin d'éviter les risques de conflits d'intérêts au regard des points traités dans le cadre de l'expertise.

Les déclarations d'intérêts des experts sont publiées sur le site internet de l'Agence (www.anses.fr).

2 Analyses et conclusions

2.1 Préambule

La troisième question de la saisine porte sur le cadmium (Cd) et les matières fertilisantes et supports de culture (MFSC). Cette question découle de plusieurs éléments cités dans la saisine et présentés ci-dessous.

Le cadmium est un élément trace métallique (ETM) ubiquitaire naturellement présent dans la croûte terrestre. Son omniprésence dans tous les compartiments de l'environnement (eau, air et sol) résulte aussi des apports anthropiques liés aux activités industrielles et aux pratiques agricoles. Le cadmium dans le sol peut exister sous forme soluble dans l'eau du sol et sous forme de complexes insolubles avec des constituants inorganiques et organiques du sol. Le Cd dans le sol tend à être plus disponible lorsque le pH du sol est bas. Le cadmium soluble peut pénétrer dans les végétaux par leurs racines et est parfois adsorbé sur les parties aériennes des végétaux (Shahid *et al.*, 2017a). Il entre ainsi dans la chaîne alimentaire (EFSA, 2009).

Une exposition prolongée au cadmium par voie orale induit chez l'Homme une atteinte tubulaire rénale mise en évidence par une micro-protéinurie, ainsi que des pathologies osseuses. Des troubles de la reproduction ont également été rapportés, ainsi qu'un risque accru de cancer ayant donné lieu à un classement du cadmium et ses composés comme « cancérigène pour l'Homme » (groupe 1) par le CIRC en 2012 et dans la catégorie 2² par l'Union européenne en 2004 (JOCE, 2004).

Le cadmium est un contaminant préoccupant pour l'Homme. En effet, selon l'avis et le rapport de l'Anses relatifs à la deuxième étude de l'alimentation totale (EAT2) publiée en juin 2011 (Anses, 2011a), l'exposition alimentaire des personnes en France au cadmium apparaît en augmentation par rapport à la précédente étude de l'alimentation totale (EAT1) parue en 2004. Un dépassement de la valeur toxicologique de référence (VTR) définie par l'EFSA en 2009 est constaté chez 0,6% des adultes et 15% des enfants. Cela indique qu'un risque sanitaire ne peut être écarté. L'Anses s'est autosaisie sur les suites à donner à cette deuxième EAT, en particulier sur le cadmium, pour lequel il s'agit d'identifier l'origine de la forte augmentation des expositions entre les deux études disponibles³. Dans son avis de novembre 2011 relatif à la révision des teneurs maximales en cadmium des denrées alimentaires destinées à l'Homme (Anses, 2011b), l'Anses recommande, afin de réduire l'exposition de la population, d'agir sur le niveau de contamination des sources environnementales, en particulier au niveau des intrants (engrais contaminés, épandage des boues de station d'épuration...) en partie à l'origine de la contamination des sols et des aliments.

Au niveau européen, parmi ces intrants, les engrais inorganiques minéraux commercialisés sont définis par le règlement (CE) n°2003/2003 du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003⁴, modifié par le règlement (UE) n°463/2013 de la Commission du 17 mai 2013. Actuellement, la norme française NF U 42-001-1 fixe pour ces engrais minéraux commercialisés une teneur

² Correspondant à la catégorie 1B actuelle définie par le règlement (CE) N°1272/2008 : substance présumée cancérigène chez l'être humain

³ ANSES. (2011). Avis de l'Anses relatif à la révision des teneurs maximales en cadmium des denrées alimentaires destinées à l'homme. (saisine n°2011-SA-0194), Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort.

⁴ Règlement (CE) n°2003/2003 du parlement européen et du conseil du 13 octobre 2003 relatif aux engrais.

maximale réglementaire en cadmium de $90 \text{ mg Cd.kgP}_2\text{O}_5^{-1}$. Cependant, un projet de nouveau règlement européen élargi à l'ensemble des matières fertilisantes (engrais minéraux et organiques, amendements minéraux et organiques : carbonates, dolomie, composts, lisiers...) et supports de cultures est en cours d'élaboration et vise la fixation de valeurs limites en contaminants. La fixation de telles teneurs concernera donc le cadmium dans le cadre de la mise à disposition sur le marché des matières fertilisantes et supports de culture porteurs du marquage CE. Dans ce contexte, la France a soutenu la récente proposition de la Commission européenne de soumettre au Comité scientifique des risques sanitaires et environnementaux (SCHER) l'étude publiée en 2013 de Fertilizer Europe⁵ (représentant les principaux fabricants d'engrais minéraux en Europe (28 états membres + la Norvège)), pour évaluation, notamment par rapport au risque sanitaire. En effet, au regard des données récentes, cette étude actualise un travail antérieur du Comité scientifique sur la toxicité, l'écotoxicité et l'environnement (CSTEE devenu le SCHER) datant de 2002⁶ sur le cadmium dans les engrais minéraux phosphatés. Le 06 janvier 2016 suite à la réunion plénière du 27 novembre 2015, le SCHER a publié son avis final relatif à l'analyse de l'étude de Fertilizer Europe portant sur les nouvelles conclusions par rapport aux futures tendances estimées du cumul en cadmium dans les sols après apport de cadmium dans les sols par les fertilisants phosphatés⁷.

- ⇒ Au regard de ces éléments, l'Anses est conjointement saisie par ses cinq ministères de tutelles pour émettre un avis sur l'exposition au cadmium, et notamment sur la proposition de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes et supports de culture permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles, la contamination des productions végétales et *in fine* de réduire l'exposition des consommateurs de végétaux cultivés sur des sols amendés par des matières fertilisantes.

2.2 Le cadmium : un contaminant de l'environnement et de la chaîne alimentaire

Le cadmium se caractérise par un comportement bioaccumulable. La population générale y est principalement exposée par la voie alimentaire, hors tabagisme (Efsa, 2009, 2012). La contamination des aliments s'explique notamment par la facilité relative des végétaux à absorber le cadmium *via* leur système racinaire.

Chez l'Homme, le cadmium est largement distribué dans l'organisme humain, dans lequel il s'accumule avec le temps. La demi-vie d'élimination biologique est comprise entre 10 et 30 ans (12 ans en moyenne). Le cadmium est principalement présent dans le foie et les reins (ATSDR, 2012).

Concernant ses principales caractéristiques toxicologiques, une exposition prolongée par voie orale au cadmium induit, chez l'Homme, une néphropathie, des pathologies osseuses, des troubles de la reproduction ainsi qu'un risque accru de cancer de plusieurs organes (poumon, prostate et rein). Ainsi, le cadmium et ses composés sont classés « cancérigène pour l'Homme » (groupe 1) par le CIRC.

Le travail mené dans le cadre de la question 1 de cette saisine a permis de réviser la valeur toxicologique de référence (VTR) par ingestion (cf rapport expertise collective question 1 de

⁵ Revisiting and updating the effect of phosphate fertilizers to cadmium accumulation in European agricultural soils.

⁶ CSTEE, Scientific Committee on Toxicity, Ecotoxicity and the Environment Brussels, C2/AST/csteeop/Cadmium in fertilizers 24092002/D(02), (2002). Opinion on "The Member State Assessments of the Risk to Health and the Environment from Cadmium in Fertilizers".

⁷ SCHER, Scientific Committee on Health and Environmental Risks (2015). Final Opinion on new conclusions regarding future trends of cadmium accumulation in EU arable soils. Adopted by the SCHER during its plenary meeting of 27 November 2015.

l'Anses). En effet, auparavant, trois VTR chroniques par voie orale étaient recommandées par différents organismes sanitaires européen, internationaux et nord-américain, à savoir l'EFSA (Autorité européenne de sécurité des aliments), le JECFA (Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives) et l'ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). Ces instances sanitaires considéraient les effets rénaux comme effets critiques, sur la base d'une accumulation du cadmium au niveau des tubules proximaux entraînant leur dégénérescence et leur atrophie, et se caractérisant par une fuite de protéines de faible poids moléculaire (β -2- microglobuline, retinol-binding protein (RBP), α -1- microglobuline...). Une Dose Hebdomadaire Tolérable (DHT) avait été fixée de manière provisoire à $7 \mu\text{g.kg pc}^{-1}.\text{sem}^{-1}$ en 1989 par le JECFA et a été confirmée à plusieurs reprises. En 2008, l'ATSDR réévaluait le profil toxicologique du cadmium et proposait une MRL (Minimal Risk Level) chronique du cadmium par voie orale à $0,1 \mu\text{g.kg pc}^{-1}.\text{j}^{-1}$, valeur publiée en 2012 (ATSDR, 2012). L'EFSA, quant à elle, avait abaissé en 2009 la dose hebdomadaire tolérable de $7 \mu\text{g.kg pc}^{-1}.\text{sem}^{-1}$ à $2,5 \mu\text{g.kg pc}^{-1}.\text{sem}^{-1}$, suivant une approche « benchmark dose » modélisant la relation dose/effet entre Cd urinaire et la concentration urinaire de β -2-microglobuline à partir des données de 30 000 individus issues de 35 études (EFSA, 2009). En 2010, le JECFA a révisé sa VTR et a fixé une dose mensuelle tolérable provisoire (DMTP) de $25 \mu\text{g.kg pc}^{-1}.\text{mois}^{-1}$ (JECFA 2011).

Cependant, le travail mené dans le cadre de la question 1 de cette saisine sur la révision de la VTR par voie orale du cadmium (cf rapport expertise collective question 1 de l'Anses) a permis, en considérant de nouvelles données toxicologiques postérieures à 2011, de retenir les effets osseux comme les effets critiques les plus pertinents sur la base des études épidémiologiques d'Engström *et al.* (2011 et 2012). A partir de ces études, la concentration en cadmium urinaire ([CdU]) la plus basse de $0,5 \mu\text{g.g}^{-1}$ de créatinine, liée à une exposition par ingestion, et basée sur une modification de la densité osseuse chez la femme adulte pouvant entraîner un risque d'ostéoporose ou de fractures, a été considérée comme la dose sans effet observable (No Observed Adverse Effect Level (NOAEL)) et choisie comme point de départ toxicologique. La VTR par voie orale a été construite en utilisant le modèle cinétique de Kjellström et Nordberg (1978) qui permet de faire le lien entre les concentrations urinaires de cadmium et les valeurs d'exposition par la voie orale. Une Dose Journalière Tolérable (DJT) de $0,35 \mu\text{g Cd.kg p.c}^{-1}.\text{j}^{-1}$ ou une Dose Hebdomadaire Tolérable (DHT) de $2,45 \mu\text{g Cd.kg p.c}^{-1}.\text{sem}^{-1}$ entraînant une concentration urinaire de cadmium de $0,5 \mu\text{g.g}^{-1}$ de créatinine, chez un adulte de 60 ans en supposant que l'ingestion soit la seule source d'exposition de cadmium, a pu être établie (cf rapport 1).

Une réglementation relative au cadmium (Règlement CE n°1881/2006⁸) a été progressivement mise en place puis amendée à l'échelle de l'Union européenne : elle est basée sur la fixation de teneurs maximales réglementaires (TM) de certains contaminants dans les denrées alimentaires commercialisées assortie d'une disposition générale interdisant la mise sur le marché de toute denrée dont la concentration en ces contaminants dépasse la TM fixée pour celle-ci. Des TM ont été fixées pour le cadmium pour les légumes (-feuilles/-tubercules/-racines et autres), fruits, champignons, blé, riz, produits à base de cacao, viandes et abats, poissons, crustacés, mollusques, préparations infantiles (à base de lait ou de céréales), et pour certains compléments alimentaires et produits à base de soja. En 2011, suite à l'abaissement du seuil toxicologique d'un facteur 3 par l'EFSA (2009) et à l'observation du dépassement de la DHT de l'EFSA de 0,6% chez les adultes et de 15% chez les enfants dans le cadre de l'EAT2 (Anses, 2011a), une révision des TM pour le Cd dans les denrées alimentaires a été initié au niveau européen. Dans ce cadre, l'Anses avait été saisie pour réaliser des simulations pour vérifier l'impact de l'abaissement des TM sur les niveaux d'exposition de la population française au cadmium (Anses, 2011b). Les aliments contribuant majoritairement à l'exposition au cadmium identifiés sont les pains et produits de

⁸ Règlement (CE) n°1881/2006 de la Commission du 19 décembre 2006 portant fixation de teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires

panification sèche ainsi que les pommes de terre et produits apparentés (Anses, 2011a, b). Les simulations faites, notamment sur les contributeurs majeurs à l'exposition au cadmium, ont montré un impact modéré de l'abaissement des TM sur l'exposition du consommateur. Ainsi, à l'issue de ce travail, afin de réduire le niveau d'exposition de la population, il était recommandé d'agir sur le niveau de contamination des sources environnementales, en particulier au niveau des intrants ou matières fertilisantes (engrais contaminés, épandage des boues de station d'épuration...) à l'origine de la contamination des sols et des aliments.

Plus récemment, l'étude de l'alimentation totale infantile (EATi) de l'Anses publiée en septembre 2016 (Anses, 2016)⁹ fait le même constat que l'EAT2, à savoir que le risque sanitaire ne peut être écarté pour les enfants de moins de trois ans. Dans l'EATi, les contributeurs majeurs à l'exposition au cadmium pour les plus de 5 mois sont identiques à ceux identifiés dans la population générale. Il est conclu que les recommandations émises pour réduire l'exposition de la population générale et visant à diminuer les concentrations de cadmium dans les principaux contributeurs sont également pertinentes dans le cas des enfants de moins de 3 ans afin de limiter l'accumulation du cadmium dès le plus jeune âge.

- ⇒ Les résultats de l'EAT2 et l'EATi montrent donc que la mise en place ou le renforcement de mesures de gestion visant à limiter les niveaux d'exposition au cadmium s'avèrent nécessaires. Tel qu'indiqué dans l'EATi, afin de diminuer les niveaux d'exposition des consommateurs il convient le plus souvent d'abaisser les niveaux de contamination des aliments identifiés comme principaux contributeurs à l'exposition par le biais notamment d'une politique de maîtrise des rejets environnementaux ou de maîtrise des procédés ou de fixation de seuils réglementaires (ou de diminution de ces seuils s'ils existent déjà).

2.3 Les matières fertilisantes

2.3.1 Définition et réglementation

2.3.1.1 Définition

Les matières fertilisantes sont définies dans le code rural et de la pêche maritime Article L. 255-1, comme des produits destinés à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux ou les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols. Elles comprennent, notamment :

1. Les engrais destinés à apporter aux plantes des éléments directement utiles à leur nutrition. Il peut s'agir d'éléments fertilisants :
 - Majeurs : azote (N), phosphore (P), potassium (K),
 - Secondaires : calcium (Ca), magnésium (Mg), sodium (Na), soufre (S),
 - ou d'oligo-éléments : bore (B), cobalt (Co), cuivre (Cu), fer (Fe), iode (I), manganèse (Mn), molybdène (Mo), nickel (Ni), sélénium (Sn), zinc (Zn).

Les engrais peuvent être organiques, inorganiques (on parle également d'engrais minéraux dans ce 2^{ème} cas) ou organo-minéraux.

2. Les amendements destinés à modifier ou à améliorer les propriétés physiques, chimiques ou biologiques des sols. Les amendements peuvent être organiques, minéraux ou organo-minéraux.

⁹ ANSES. 2016. Avis de l'Anses et rapport d'expertise relatifs à l'Etude de l'Alimentation Totale Infantile (EATi) - Tome 1 : Avis de l'Anses & Synthèse et conclusions, Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort.

3. Les matières dont la fonction, une fois appliquées au sol ou sur la plante, est de stimuler des processus naturels des plantes ou du sol, afin de faciliter ou de réguler l'absorption par celles-ci des éléments nutritifs ou d'améliorer leur résistance aux stress abiotiques.
4. Les supports de culture sont des produits destinés à servir de milieu de culture à certains végétaux et à leur permettre, par ancrage de leurs organes absorbants, d'être en contact avec les solutions nutritives nécessaires à leur croissance.
5. Les adjuvants pour matières fertilisantes sont des préparations qui modifient les qualités physiques, chimiques ou biologiques d'une matière fertilisante, à laquelle elles sont ajoutées en mélange extemporané.

(Sources : code rural et de la pêche maritime article L.255-1 ; Règlement (CE) n°2003/2003¹⁰ pour la liste des éléments majeurs, secondaires et oligoéléments)

2.3.1.2 Règlementation

En France, la mise sur le marché et l'utilisation des matières fertilisantes, des adjuvants pour matières fertilisantes et des supports de culture est encadrée par le code rural et de la pêche maritime (Articles L.255-1 à L.255-18) qui s'est substitué à la loi du 13 juillet 1979 relative à l'organisation du contrôle des MFSC. Le code rural et de la pêche maritime (Articles L.255-2 à L.255-13) prévoit que les MFSC doivent disposer d'une autorisation pour être mises sur le marché. Néanmoins, bien que l'autorisation de mise sur le marché (AMM) soit la règle, sont dispensés des obligations prévues aux articles L.255-2 à L.255-4 du code rural et de la pêche maritime :

1. les MFSC conformes à une norme rendue d'application obligatoire ;
2. les MFSC conformes à un règlement de l'Union européenne ;
3. les MFSC conformes à un cahier des charges approuvé par voie réglementaire garantissant leur efficacité et leur innocuité ;
4. les substances naturelles à usage biostimulant ;
5. les déchets, résidus ou effluents [...] dont l'évacuation ou le déversement sur des terres agricoles en tant que matières fertilisantes fait l'objet d'un plan d'épandage ;
6. les matières organiques brutes ou les supports de culture d'origine naturelle, livrés en l'état ou mélangés entre eux, obtenus à partir de matières naturelles sans traitement chimique et constituant des sous-produits d'une exploitation agricole ou d'un établissement non agricole d'élevage ou d'entretien des animaux lorsqu'ils sont cédés directement, à titre gratuit ou onéreux, par l'exploitant ou le responsable de l'établissement.

En France, les autorisations de mise sur le marché (AMM) sont instruites par la Direction des autorisations de mise sur le marché (DAMM) de l'Anses, en se fondant sur les conclusions de l'évaluation scientifique des dossiers de demande d'AMM de la Direction d'évaluation des produits réglementés (DEPR) de l'Anses. La DEPR évalue, sur la base des données soumises par le demandeur dans son dossier d'AMM et dans les conditions d'emploi prescrites, d'une part les effets des MFSC sur la santé humaine, la santé animale et sur l'environnement et, d'autre part, leur efficacité agronomique.

¹⁰ Règlement (CE) n°2003/2003 du parlement européen et du conseil du 13 octobre 2003 relatif aux engrais

Selon le cadre réglementaire qui s'applique (AMM, norme, cahier des charges, plan d'épandage), la mise sur le marché des MFSC est notamment subordonnée, dans le cadre des utilisations demandées, aux critères d'innocuité définis pour les contaminants chimiques et biologiques pour lesquels il existe des valeurs (teneurs et/ou flux) de référence (Eléments Traces Métalliques (ETM), Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP), Polychlorobiphényles (PCB), micro-organismes) dans le cadre des utilisations demandées.

Le tableau 1 présente les seuils établis pour les contaminants chimiques en fonction des principaux cadres réglementaires actuellement en vigueur.

Tableau 1. Informations relatives aux teneurs limites (mg.kg⁻¹MS) en éléments traces métalliques et micropolluants organiques dans les boues de STEP, matières fertilisantes et supports de culture commercialisés

	NF U44-051 (Avril 2006) (amendements organiques)	NF U44- 551/A3 (Janvier 2008) * (support de cultures)	NF U44-095 (Mai 2002) (amendements organiques - composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux)	Boues STEP (Arrêté du 8/01/1998)	NF U42-001- 1 (Octobre 2011)(engrais minéraux)
Eléments traces Métalliques					
Arsenic (As)	18	-	18	-	60
Cadmium (Cd)	3	2	3	10	90 mg.kg⁻¹.P₂O₅⁻¹
Chrome (Cr)	120	150	120	1000	120
Cuivre (Cu)	300	100	300	1000	-
Mercure (Hg)	2	1	2	10	2
Nickel (Pb)	60	50	60	200	120
Plomb (Pb)	180	100	180	800	150
Sélénium (Se)	12	-	12	-	-
Zinc (Zn)	600	300	600	3000	-
Cr + Cu + Ni + Zn	-	-	-	4000	-
Micropolluants organiques					
Total des 7 PCB	-	-	0.8	0.8	-
HAP					
Fluoranthène	4	-	4	5(1)	-
Benzo(b)fluoranthène	2.5	-	2.5	2.5	-
Benzo(a)pyrène	1.5	-	1.5	2(2)	-

* Ces seuils s'appliquent pour tous les supports de culture sauf les laines minérales, roche volcanique, perlite, vermiculite et argile expansée.

(1) 4 mg.kg⁻¹MS si l'épandage est prévu sur pâturages ; (2) 1,5 mg.kg⁻¹MS si l'épandage est prévu sur pâturages

Le tableau 2 présente les flux maximaux annuels (moyens sur 10 ans) en éléments traces métalliques et composés traces organiques définis dans le cadre de l'homologation des matières fertilisantes.

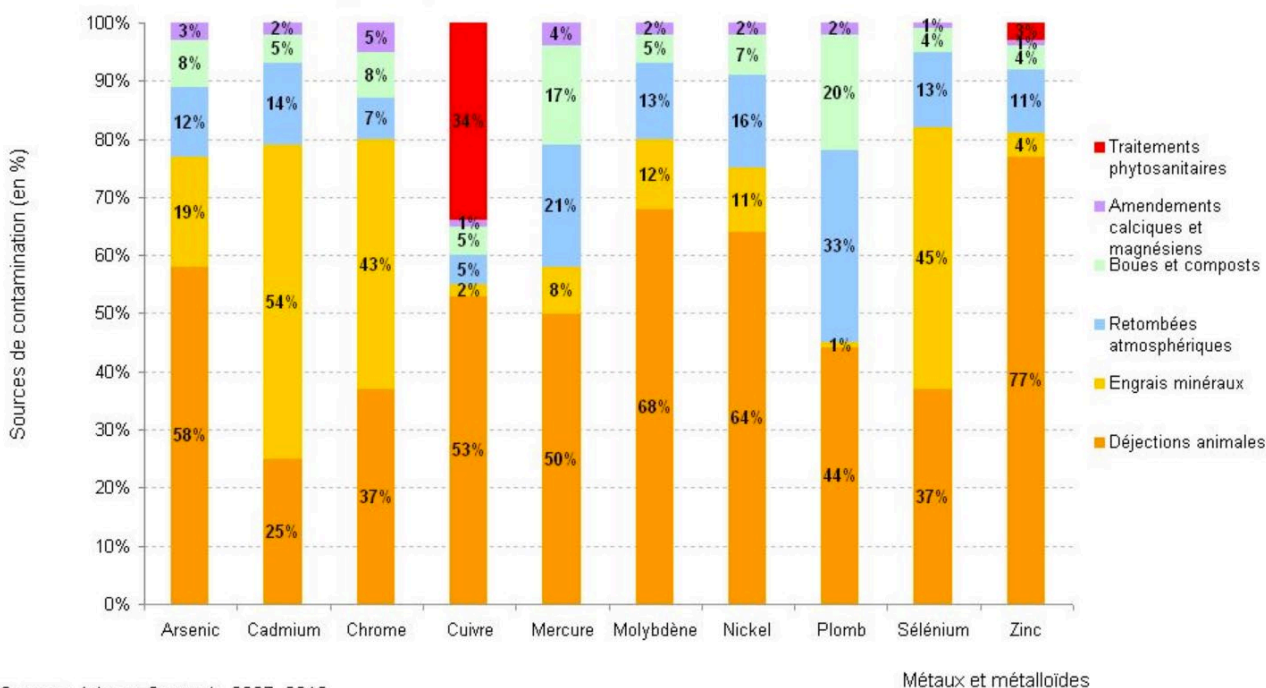
Tableau 2. Informations relatives aux flux maximaux annuels (moyens sur 10 ans) (g.ha⁻¹) en éléments traces métalliques et composés traces organiques pour l'homologation des matières fertilisantes

	Homologation
Eléments traces métalliques	
Arsenic (As)	90
Cadmium (Cd)	15
Chrome (Cr)	600
Cuivre (Cu)	1 000
Mercure (Hg)	10
Nickel (Pb)	300
Plomb (Pb)	900
Sélénium (Se)	60
Zinc (Zn)	3 000
Composés traces organiques	
PCB : congénère 28 ou 52 ou 101 ou 118 ou 138 ou 153 ou 180	0,3
PCB : total 7 principaux congénères : 28+52+101+118+138+153+180	1,2
fluoranthène	6,0
benzo(b) fluoranthène	4,0
benzo(a)pyrène	2,0

Le rapport d'expertise collective relative à la question 2 présente et décrit les études de filières des différentes matières fertilisantes. Il est noté que ces différentes matières fertilisantes, commercialisées ou non, peuvent constituer une source d'apport en cadmium pour les sols. Parmi les matières fertilisantes actuellement proposées sur le marché, les engrais phosphatés fabriqués à partir des roches naturelles constituent la source majoritaire d'apport en cadmium de par leur concentration en ce contaminant et des quantités couramment utilisées en agriculture en France. Le rapport ADEME-SOGREAH (2007)¹¹ indique que les engrais phosphatés constituent un peu plus de la moitié des apports en cadmium au sol, alors que les déjections animales (effluents d'élevage, pissats et bouses) représentent 25% de ceux-ci (Figure 1).

¹¹http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/fileadmin/documents/Produits_editoriaux/L_essentiel_sur/Environnement/Sol_et_sous-sol/Le_sol/2014/sol2014-graph10b.jpg

Part des différentes sources de contamination dans l'estimation des quantités totales de métaux et métalloïdes entrant sur les sols agricoles, en %



Source : Ademe-Sogreah, 2007, 2012.

Figure 1. Part des différentes sources de contamination des quantités totales de métaux et métalloïdes entrant sur les sols agricoles français (source : Ademe-Sogreah, 2007, 2012)

2.3.2 Les engrais phosphatés minéraux commercialisés : source importante d'apport en cadmium

2.3.2.1 Origine du cadmium dans les engrais minéraux

Les cultures ont besoin de phosphore pour leur croissance et cet élément est apporté de façon relativement systématique sur les sols cultivés par les engrais phosphatés minéraux commercialisés. Ceux-ci sont fabriqués à partir des roches naturelles pouvant contenir du cadmium en concentrations parfois importantes (selon l'origine de la roche) tel qu'indiqué dans le tableau 3 issu de la publication de Roberts (2014)¹². Les teneurs moyennes varient de 21 mg.kg⁻¹ en moyenne pour les gisements issus de roches sédimentaires à seulement 2 mg.kg⁻¹ pour les roches ignées. Les teneurs maximales en cadmium dans les minéraux phosphatés commercialisés peuvent être beaucoup plus élevées et dépasser 100 mg.kg⁻¹.

¹² Roberts, T. L. (2014). Cadmium and phosphorous fertilizers: the issues and the science. Procedia Engineering, 83, 52-59.

Tableau 3. Concentration en cadmium (mg.kg⁻¹) dans différentes roches sédimentaires ou ignées (Source : Roberts, 2014)

Pays	Dépôt	Concentration moyenne en cadmium	Plage de variation
Roches sédimentaires			
Chine	Kaiyang	<2	-
Israël	Zin	31	20-40
	Arad	14	12-17
	Oron	5	-
Jordanie	El-Hasa	5	3-12
	Shidyia	3	-
Maroc	Bou Craa	38	32-43
	Khouribga	15	3-27
	Youssoufia	23	4-51
Sénégal	Taiba	87	60-115
Syrie	Kneifiss	3	-
Togo		58	48-67
Tunisie		40	30-56
Etats-Unis	Centre Floride	9	3-20
	Floride du Nord	6	3-10
	Idaho	92	40-150
	Caroline du Nord	38	20-51
Autres pays		12	<1-100
Total moyenne roches sédimentaires		21	<1-150
Roches ignées			
Brésil	Araxa	2	2-3
	Catalao	<2	-
Afrique du Sud	Phalaborwa	1	1-2
Russie	Kola	1	<1-2
Autres pays		1	1-5
Total moyenne roches ignées		2	<1-4

2.3.2.2 Procédés de fabrication des engrais

La roche phosphatée est la matière première utilisée dans la fabrication de la plupart des engrais phosphatés sur le marché. Les caractéristiques des engrais phosphatés varient selon l'origine géographique du produit. Avec accès à des minerais riches en phosphore, le Maroc, la Chine et les Etats-Unis sont les acteurs les plus importants (source Unifa : <http://fertilisation-edu.fr/production-ressources/engrais-phosphates.html>).

Le principal minerai utilisé est le phosphate calcique naturel qui est une fluorapatite phosphocalcique : $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ plus ou moins carbonatée d'une teneur moyenne de 26 à 34 % d'anhydride phosphorique P_2O_5 (soit 57 à 74 % en phosphate tricalcique ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, PTC) pour le minerai marchand). L'appellation industrielle du phosphate tricalcique est "Bone Phosphate of Lime" (BPL).

Les principaux gisements de phosphate actuellement exploités sont de deux types :

- (1) sédimentaire (75 % des ressources) par précipitation des phosphates au fond de mers peu profondes, processus au cours duquel le plancton joue un rôle important. Les gisements du Maroc et des États-Unis sont de ce type.
- (2) igné (23 % des ressources) par intrusion de magma au sein de roches cristallines. Les gisements de la presqu'île de Kola (Finlande et Russie) et d'Afrique du Sud sont de ce type.

Le phosphate aluminocalcique : $\text{CaO}, 2\text{Al}_2\text{O}_3, \text{P}_2\text{O}_5, 5\text{H}_2\text{O}$ (34 % de P_2O_5) produit au Sénégal est aussi utilisé directement comme engrais phosphaté après calcination vers 600-700°C. Le soufre donnant l'acide sulfurique est également une matière première nécessaire à la fabrication des engrais phosphatés. En effet, quelques phosphates naturels broyés finement (Sénégal, Tunisie, États-Unis) peuvent être utilisés directement comme engrais sur des sols acides ou en agriculture biologique. Mais en général, les phosphates naturels doivent subir une attaque acide (principalement sulfurique), pour être plus solubles et phytodisponibles.

La roche phosphatée provenant des mines est d'abord envoyée aux unités de valorisation pour séparer le sable et l'argile et pour éliminer les impuretés. La plupart des procédés de fabrication des engrais phosphatés sont humides pour faciliter le transport et pour réduire les émissions de poussière. Un acide phosphorique faible (40-55 % de P_2O_5) est produit par la réaction de roche phosphatée avec de l'acide sulfurique à l'aide d'un procédé humide. L'acide phosphorique obtenu est ensuite utilisé dans la production d'une série d'engrais liquides ou solides. Les plus importants sont les superphosphates simples et triples (SSP et TSP) et les phosphates d'ammonium qui sont des engrais binaires « NP » composé d'azote (N) et de phosphore (P) (phosphate de monoammonium (MAP), phosphate de diammonium (DAP)).

Les phosphates DAP et MAP sont obtenus par neutralisation de l'acide phosphorique par l'ammoniac. Les plus courants sont le DAP 18-46-0 (18 % N - 46 % P_2O_5 - 0 % K_2O) et le MAP 11-52-0 (11 % N - 52 % P_2O_5 - 0 % K_2O). Au Maroc, la production est assurée par l'Office Chérifien des Phosphates (OCP), premier producteur mondial de phosphate naturel (PN) avec, en 2013, une production de 26,4 millions de tonnes, les capacités de production étant de 32,2 millions de tonnes par an.

En France, il n'y a pas de gisements de phosphates naturels. Cependant, jusqu'à l'arrêt de l'exploitation du minerai de fer lorrain et la production de scories de déphosphoration à partir de la minette de Lorraine qui contient de 1,5 à 2 % de phosphore, la production était, par exemple en 1995-96 de 763 t de scories soit 11 942 t en P_2O_5 .

Le tableau 4 présente les principaux engrais obtenus par traitement du phosphate naturel et la production par produit dans le monde en 2013.

Tableau 4. Principaux engrais phosphatés obtenus par traitement du phosphate naturel (PN)

Engrais phosphatés	Procédé d'obtention	Fabrication, production, utilisation
Superphosphate normal (15 à 18 % de P ₂ O ₅)	Attaque du PN par l'acide sulfurique (H ₂ SO ₄), donc principalement constitué de phosphate monocalcique et de sulfate de calcium.	Sa fabrication nécessite environ 600 kg de PN et 370 kg de H ₂ SO ₄ à 100 % pour 1 t de superphosphate. Les capacités mondiales de production sont, en 2015, de 12,4 millions de tonne de P ₂ O ₅ . Il est produit et utilisé principalement en Chine, au Brésil et en Inde.
Superphosphate concentré (25 % de P ₂ O ₅).	Obtenu par attaque sulfurique et phosphorique	
Superphosphate triple (TSP) (46 % de P ₂ O ₅)	Attaque du PN par l'acide phosphorique (H ₃ PO ₄).	Sa fabrication nécessite environ 400 kg de PN et 350 kg de H ₃ PO ₄ pour 1 t de superphosphate.
	Fabrication thermique (1250°C) de CaNaPO ₄ à partir d'un mélange phosphate, Na ₂ CO ₃ , SiO ₂ .	
	Fabrication de CaHPO ₄ par attaque du phosphate par HCl.	Utilisé surtout comme complément dans l'alimentation animale.
Phosphate d'ammonium Diammonique (DAP) (NH ₄) ₂ HPO ₄	Phosphate solide le plus concentré disponible sur le marché.	Production mondiale en 2013, de 15,7 millions de tonnes de P ₂ O ₅ .
Phosphate d'ammonium monoammonique (MAP) NH ₄ H ₂ PO ₄ .	Attaque nitrique des PN. Procédé utilisé par Yara, en Norvège.	La production mondiale est, en 2013, de 11,9 millions de tonnes de P ₂ O ₅ , dont 105 000 t dans l'Union européenne.

2.3.2.3 Teneurs en cadmium dans les engrais

Nziguheba et Smolders (2008) ont analysé le contenu en cadmium de 196 échantillons d'engrais minéraux phosphatés disponibles sur le marché européen dont 18 utilisés en France (tableau 5) et ont estimé la valeur moyenne à 7,4 mg Cd.kg⁻¹ d'engrais.

Tableau 5. Distribution des concentrations en cadmium dans 196 engrais analysés, exprimés par rapport à l'engrais ou au contenu en phosphore (P) ou anhydride phosphorique (P₂O₅)

	Exprimé par rapport à la masse de l'engrais (en mg.kg ⁻¹)	Exprimé par rapport au contenu en phosphore (P) (en mg.kg ⁻¹ P)	Exprimé par rapport au contenu en anhydride phosphorique (P ₂ O ₅) (en mg.kg ⁻¹ P ₂ O ₅)
Minimum	LQ (Limite de quantification) (soit 0,7)	-	-
Moyenne	7,4	82,7	36
Médiane	5,0	87,1	38
P90	21,0	168	73,3
P95	25,3	185	80,7
Maximum	42	-	-

En complément, Belon *et al.* (2012) ont réalisé un inventaire des éléments traces métalliques apportés sur les sols agricoles français. Six principales sources sont considérées dans cette étude : les pesticides, les engrais minéraux (intégrant les engrais phosphatés), les effluents d'élevage, les boues et composts, les amendements basiques et les dépôts atmosphériques.

Le tableau suivant résume les concentrations en cadmium identifiées en fonction de différentes catégories d'engrais phosphatés apportées au sol agricole :

Tableau 6. Concentrations en cadmium dans les catégories d'engrais (mg.kg⁻¹ MS)

Catégories d'Engrais	CdMoy	CdMin	CdMax
Simple P : TSP	19,56	8	31,9
Simple P : autres	15,26	8,1	26
Engrais NP. NK. NPK : DAP. MAP	14,15	0,2	42,1
Simple P : autres superphosphates	12,3	10,3	17,2
Engrais NP. NK. NPK : organo-minéraux	9,9	0,5	24
Engrais NP. NK. NPK : autres NP	7,11	0,2	31,9
Binaires PK : superpotassiques	6,89	2,9	12,5
Binaires PK : phospho-potassiques	6,89	2,9	12,5
Binaires PK : autres PK	6,89	2,9	12,5
Engrais NP. NK. NPK : NK. NPK	6,17	0,2	14,6
Simple N : ammonitrates	0,7	0,5	1
Simple N : autres	0,24	0	0,6
Simple K : chlorure de potassium	0,23	0,05	0,5
Simple N : urée	0,2	0,2	0,2
Simple K : sulfate de potassium	0,14	0,1	0,2
Simple K : autres	0,01	0,01	0,01

Données obtenues d'après : [Ministère de l'agriculture et de la pêche, 2003; Smolders and Nziguheba, 2006]

2.3.3 Apport en cadmium *via* les autres matières fertilisantes hors engrais minéraux phosphatés commercialisés

En plus de l'application d'engrais, d'autres épandages de matières fertilisantes telles que les boues de stations d'épuration (STEP) ou les effluents d'élevage peuvent accroître les concentrations en cadmium dans les sols cultivés. Par exemple, l'ensemble des aliments consommés par les animaux (y compris l'Homme) contient du cadmium qui est éliminé par les déjections. Ces dernières sont riches en matières organiques et en nutriments (azote et phosphore) qui apportent au sol et aux cultures un amendement et une fertilisation. Les déjections animales (effluents d'élevages) et humaines (boues de station d'épuration) sont majoritairement épandus. Les effluents d'élevage ne sont pas considérés comme des « déchets » s'ils sont épandus sur les terres des propriétaires des animaux qui les ont produits. Dans ce cas, il n'y a alors aucune réglementation sur les apports de contaminants *via* leur épandage. Ils représentent cependant un quart des apports de cadmium aux sols alors que les parts des retombées atmosphériques et des boues de STEP sont respectivement de 14 et 5% (Figure 1. ADEME-SOGREAH, 2017). Pour les boues de STEP, le plan d'épandage¹³ précise que l'apport au sol doit répondre à un besoin agronomique et fixe un seuil en cadmium dans les boues. Récemment, un cahier des charges fixant des préconisations pour les épandages de digestats de déchets agricoles¹⁴ a également défini des exigences sur les teneurs et les flux en cadmium apportés par les effluents d'élevages.

Par ailleurs, certains sous-produits ou déchets peuvent être valorisés sur les sols comme amendements organiques. Il peut s'agir notamment de composts de boues de station d'épuration, de déchets verts ou de restes de cuisine. Ces composts apportent essentiellement de la matière organique et leurs teneurs en azote et en phosphore sont plus faibles que les effluents d'élevage ou les boues de STEP. Néanmoins, les apports en azote et phosphore doivent être pris en compte dans les bilans de fumure (amélioration des terres par un fertilisant). Les normes accompagnant la mise sur le marché de ces produits tiennent compte des apports en cadmium.

Des déchets apportant du magnésium ou du calcium et entraînant une augmentation du pH des sols acides (amendements basiques) peuvent également contenir du cadmium. Cette situation est notamment observée dans le cas des amendements basiques sidérurgiques, des écumes de sucrerie ou encore des carbonates de calcium issus de la production de pâte à papier (Belon *et al.*, 2012). La norme française NF U 44-001 encadrant ces produits précise des seuils en cadmium. En ce qui concerne les produits soumis à l'obtention d'une AMM, le « Guide pour la constitution des dossiers de demande d'homologation Matières fertilisantes - Supports de culture » (formulaire cerfa n° 50644#01) précise notamment les flux de cadmium acceptables sur les sols agricoles français.

L'ensemble des seuils et des flux sont précisés au chapitre 2.3.5.

Dans son étude, Belon *et al.* (2012) identifient les concentrations en cadmium apportées aux sols agricoles français par les effluents d'élevage, les boues et composts, les amendements basiques et les dépôts atmosphériques. Celles-ci sont résumées dans les tableaux suivants.

¹³ Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées (JO du 31 janvier 1998)

¹⁴ Arrêté du 13 juin 2017 approuvant un cahier des charges pour la mise sur le marché et l'utilisation de digestats de méthanisation agricoles en tant que matières fertilisantes

Tableau 7. Concentration en cadmium des effluents d'élevage (mg.kg⁻¹ MS)

Catégorie Effluents	CdMoy	CdMin	CdMax
Porcin - émis au champ	0,49	0,4	0,64
Porcin - lisier	0,49	0,4	0,64
Poules pondeuses - lisier	0,49	0,4	0,64
Ovins - émis au champ	0,32	0,02	1,18
Ovins - fumier	0,32	0,02	1,18
Caprins - émis au champ	0,28	0,02	1,11
Caprins - fumier	0,28	0,02	1,11
Bovins - émis au champ	0,27	0,1	0,96
Bovins - fumier	0,27	0,1	0,96
Bovins - lisier	0,27	0,1	0,96
Porcin - fumier	0,25	0,2	0,3
Poulets chair/dinde - fumier	0,25	0,2	0,3
Poulets chair/dinde - lisier	0,25	0,2	0,3
Equins - émis au champ	0,2	0,2	0,2
Equins - fumier	0,2	0,2	0,2

Données issues de [Plateau, 2001], [Levasseur, 2005]

Tableau 8. Concentration en cadmium des amendements basiques Ca et Mg (mg.kg⁻¹ MS)

Catégories Amendements	CdMoy	CdMin	CdMax
Amendements engrais	1,73	0	9,86
Chaux vives magnésiennes	1,05	0,025	18,6
Ecumes de sucrerie	0,64	0,09	2
Dolomies	0,6	0,005	7,4
Chaux vives calciques	0,35	0,01	41,24
Carbonates	0,15	0,005	3,8
Boues de désencrage	0,02	0	1,54

Données obtenues d'après : [AFNOR, 2001; CE et al.; Ministère de l'agriculture et de la pêche, 2003]

Tableau 9. Teneurs en cadmium dans les boues de STEP et les composts (mg.kg⁻¹ MS)

Catégorie	CdMoy	CdMin	CdMax
Compost de boues de STEP	1,62	0,1	12
Boues épandues en agriculture	1,6	0,037	50
Compost de déchets verts	1,37	0,1	17,1
Compost de biodéchets	1,07	0,5	3,5
Boues papeterie (primaires et mixtes)	1	0	4

Données obtenues d'après : [AND International, 2002; Charonnat *et al.*, 2001; Jumeau *et al.*, 2001]

Enfin, l'usage agronomique des digestats (de boues de STEP, de biodéchets ou d'effluents d'élevages) se développe par des incitations de la politique énergétique renouvelable¹⁵. Une étude (ADEME, 2011) a rassemblé les informations disponibles dans la littérature scientifique, ainsi

¹⁵ plan « Énergie Méthanisation Autonomie Azote » 2013

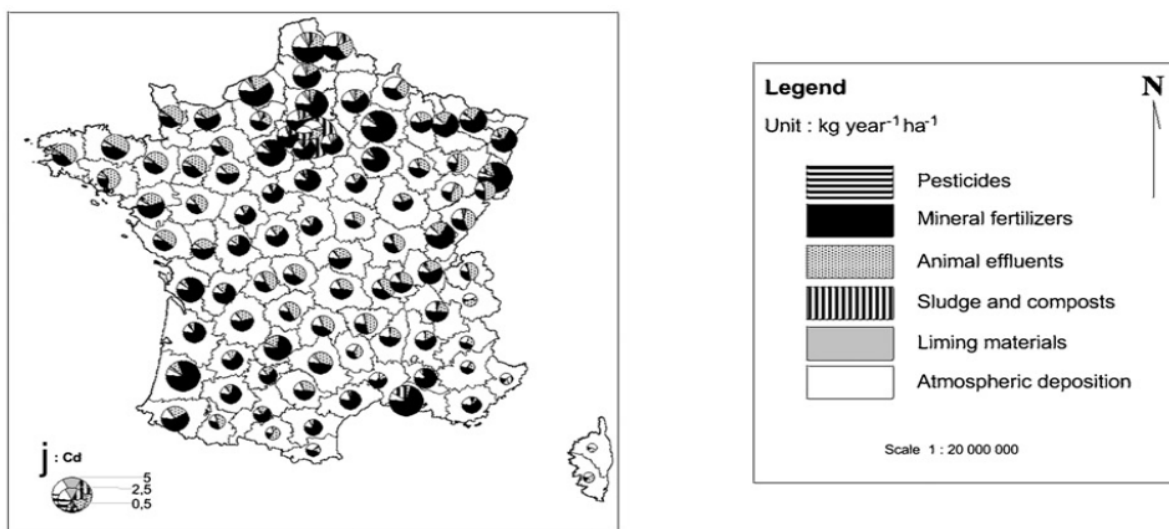
qu'après des exploitants de méthaniseurs afin d'essayer de caractériser les digestats en fonction des intrants et des procédés utilisés. Le tableau 10 rapporte les concentrations en cadmium identifiées dans les digestats d'origine agricole et des matières végétales à partir de cette étude.

Tableau 10. Teneurs en cadmium des digestats d'origine agricole et des matières végétales (mg.kg⁻¹ MS)

Nature de digestat	Effectif	Moyenne	Médiane	Minimum	Maximum	25 ^e centile	75 ^e centile
Brut	20	0,697	0,5	0,12	2,74	0,28	0,605
Liquide	40	0,476	0,47	Nq	1,3	0,31	0,615
Solide	47	0,366	0,18	Nq	2,54	0,13	0,42
Total	107	0,469	0,37	Nq	2,74	0,17	0,56

2.3.4 Bilan des apports en cadmium par les matières fertilisantes sur les sols agricoles français

En complément de la figure 1 en section 2.3.1, la figure 2 montre que les apports en cadmium au sol en France dans le cadre des matières fertilisantes, en dehors des produits phytosanitaires, sont fortement liés aux fertilisants phosphatés minéraux dans les départements de grandes cultures. Il est également observé que les effluents d'élevage contribuent significativement aux apports au sol dans les régions d'élevage (Bretagne par exemple).



Pesticides = produits phytosanitaires ; Mineral fertilizers = fertilisants minéraux ; animal effluents = effluents d'élevage ; sludge and composts = boues et composts ; liming materials = matériaux de chaulage ; atmospheric deposition = dépôts atmosphériques)

Figure 2. Apport au sol du cadmium en France sur les sols agricoles (source Belon *et al.*, 2012)

Pour l'ensemble de la France, les apports en cadmium *via* les différentes catégories de matières fertilisantes sont présentés dans le tableau 11 :

Tableau 11. Flux annuels moyen, minimum et maximum de cadmium apportés aux sols agricoles selon différentes sources

Catégorie	CdMoy kg.an ⁻¹	CdMin kg.an ⁻¹	CdMax kg.an ⁻¹
Total Engrais minéraux	29096	6848	65985
Engrais phosphatés	26696	5205	62449
Total Déjections animales	13157	5463	42727
Retombées atmosphériques	7498	4390	11985
Total Boues et composts	2611	197	39217
Total Amendements calciques et magnésiens	1300	77	19168
Total porcins	927	751	1171
Boues de STEP urbaines	663	15	20729

D'après Belon *et al.* (2012)

Le tableau 11 corrobore le fait que les apports au sol sont majoritairement liés aux engrais phosphatés (plus de 26 tonnes par an en moyenne). Ces derniers sont suivis par les déjections animales représentant plus de 13 tonnes par an en moyenne. Les boues de STEP n'apportent en moyenne que 0,6 tonne de cadmium pour une année.

Dans la suite de l'expertise, le travail permettant de proposer un seuil en cadmium dans les matières fertilisantes se focalisera sur les données disponibles pour les forts contributeurs en cadmium, excluant les faibles contributeurs en cadmium tels que les amendements calciques et magnésiens. Par ailleurs, des moyennes de valeurs et des regroupements seront faits.

2.3.5 Les limites en cadmium dans les matières fertilisantes

La volonté de maîtriser l'apport en cadmium par les matières fertilisantes n'est pas nouvelle et se traduit dans la réglementation française par des critères d'innocuité pour les contaminants (Cf.section 2.3.1.2). Cela se traduit par des teneurs maximales réglementaires dans les produits et/ou par des flux maximaux par parcelle correspondant aux valeurs suivantes en fonction du cadre réglementaire:

- Dans le cadre de l'AMM : un flux maximal annuel (moyen sur 10 ans) de 15 g.ha⁻¹ est défini pour le cadmium (soit un apport cumulé de cadmium autorisé sur 10 ans de 150 g.ha⁻¹). Par ailleurs, par apport, le flux maximal ne doit pas dépasser trois fois le flux maximal annuel de 15 g.ha⁻¹ (soit 45 g par apport et par hectare).
- Dans le cadre des normes : des teneurs maximales dans les produits sont définies selon les normes :
 - NF U 42-001-1 (engrais minéraux) : 90 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹
 - NF U 42-004 (solutions nutritives minérales) : 1 mg Cd.kg⁻¹ engrais
 - NF U 44-001(amendements minéraux) : teneurs variables en fonction de l'origine (1,5 à 41 mg Cd.kg⁻¹ de produit sec ou matière sèche (MS))
 - NF U 44-051 et NF U 44-095 (amendements organiques), cahier des charges pour la mise sur le marché et l'utilisation de digestats de méthanisation agricoles en tant que matières fertilisantes (arrêté du 13 juin 2017) : 3 mg Cd.kg⁻¹ MS + flux AMM
 - N F U44-551 (support de cultures) : 2 mg Cd.kg⁻¹ MS
- Dans le cadre des plans d'épandage : 150 g Cd.ha⁻¹ sur 10 ans, 10 mg Cd.kg⁻¹ MS déchet/effluent, avec une restriction sur la teneur maximale des sols receveurs dont la concentration ne doit pas excéder 2 mg Cd.kg⁻¹ MS sol (arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation).

Le règlement CE n°2003/2003¹⁶ relatif aux engrais ne fixe pas de limite en cadmium dans les engrais CE¹⁷, il est prévu que de telles limites soient incluses dans sa révision.

Ainsi, les réglementations européenne et nationale actuelles encadrant les matières fertilisantes visent à limiter la contamination des sols, mais ne prennent pas en compte des considérations de risque pour l'Homme, notamment pour le consommateur. Actuellement, la Commission européenne souhaite réviser cette réglementation avec pour objectif la fixation de nouvelles valeurs limites des contaminants dans l'ensemble des matières fertilisantes, tenant compte des effets adverses pour l'Homme et l'environnement¹⁸. Il est notamment envisagé dans le cadre d'un engrais organo-minéral une teneur abaissée en cadmium de ce fertilisant porteur du marquage CE pour une teneur en phosphore (P) total égale ou supérieure à 5 % en masse d'équivalent anhydride phosphorique (P_2O_5) (« engrais phosphaté ») à la valeur de 60 mg Cd.kg $P_2O_5^{-1}$, puis une réduction 3 ans après de ce seuil à 40 mg Cd.kg $P_2O_5^{-1}$ et finalement après 12 ans à 20 mg Cd.kg $P_2O_5^{-1}$. Il y est également proposé, pour les amendements minéraux basiques et organiques porteurs du marquage CE, une valeur seuil en Cd de 3 mg.kg⁻¹ de matière sèche et pour les amendements inorganiques une valeur seuil en Cd de 1,5 mg.kg⁻¹ de matière sèche. Le Conseil de l'Europe propose une teneur en cadmium dans l'engrais organo-minéral porteur du marquage CE pour une teneur en phosphore (P) total égale ou supérieure à 5 % en masse d'équivalent anhydride phosphorique (P_2O_5) de 60 mg Cd.kg $P_2O_5^{-1}$ ¹⁹.

- ⇒ En résumé, les matières fertilisantes constituent une source d'apport en cadmium dans les sols agricoles, point d'entrée de la chaîne alimentaire, les engrais minéraux phosphatés constituant la source d'apport majoritaire. Afin de réduire l'exposition de la population, il est recommandé d'agir sur le niveau de contamination de ces sources environnementales, à l'origine en partie de la contamination des sols et des aliments. L'épandage de ces matières fertilisantes nécessite ainsi un renforcement de l'encadrement réglementaire afin de limiter les répercussions environnementales et sanitaires.

2.4 La fertilisation phosphatée des cultures

2.4.1 Les besoins des plantes en phosphore

Comme l'azote (N) et le potassium (K), le phosphore (P) est un élément minéral (non-substituable, et indispensable), essentiel à la croissance des plantes. En effet, il est présent dans les membranes cellulaires (phospholipides membranaires), dans de nombreux constituants biochimiques de la cellule où il intervient notamment dans les échanges d'énergie (Adénosine Triphosphate (ATP)) et dans le noyau où il est le support de l'information génétique (ADN). À ce titre, il joue un rôle clé dans les mécanismes génétiques, le métabolisme énergétique et la structure des cellules des êtres vivants.

Dans les sols, il est présent sous de nombreuses formes chimiques à la fois minérales et organiques, en équilibre les unes avec les autres. Seule une petite fraction du phosphore total est

¹⁶ Règlement (CE) n° 2003/2003 du parlement européen et du conseil du 13 octobre 2003 relatif aux engrais.

¹⁷ A noter que trois décisions de la Commission européenne autorise la Finlande, l'Autriche et la Suède à refuser l'entrée sur leur territoire d'engrais phosphatés CE s'ils contiennent plus de 50, 75 ou 100 mg.kg $P_2O_5^{-1}$, respectivement pour chaque pays.

¹⁸ European commission (2016). Limits for cadmium in phosphate fertilisers. Accompanying the document Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council laying down rules on the making available on the market of CE marked fertilizing products and amending.

¹⁹ Council of the European Union (2017). Working document from Presidency to Working Party on Technical Harmonisation (Dangerous Substances - Fertilisers) - Compromise for cadmium limits in phosphate fertilisers.

disponible pour les plantes. Il pénètre dans les plantes par les racines, sous forme d'ions phosphate HPO_4^{2-} ou H_2PO_4^- présents dans la solution du sol (Plassard *et al.*, 2015). En fonction de l'exploration du sol par les racines de la plante mais aussi de la présence de symbioses avec des champignons (les mycorhizes), la plante aura accès à plus ou moins de phosphore. Cependant, la concentration du phosphore dans la solution du sol étant faible par rapport aux besoins de la plante et la capacité du sol à réapprovisionner la solution étant généralement limitée, ces éléments sont considérés comme des facteurs limitant la croissance des végétaux.

Dans les systèmes cultivés, cette limite est levée par la fertilisation minérale (engrais) ou organique (effluents d'élevage, boues) qui visent à compenser les exportations de phosphore dues à la culture précédente et à combler les besoins en phosphore de la culture en place. Pour raisonner la fertilisation en phosphore des plantes, le Comité français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée (Comifer) propose une approche opérationnelle basée sur l'exigence des cultures, la biodisponibilité du phosphore dans le sol et des pratiques de l'agriculteur.

La notion « d'exigence » représente la sensibilité des plantes à la carence en phosphore, liée à la nature de leur système racinaire ou à leur métabolisme. Ainsi, selon leur niveau d'exigence, les cultures sont classées en trois groupes (source Comifer : <http://www.comifer.asso.fr/images/publications/livres/tablesexportgrillescomifer2009.pdf>) :

- Celles très exigeantes en phosphore, par exemple : pomme de terre, luzerne, colza, betterave;
- Celles moyennement exigeantes, par exemple : blé dur, orge, maïs ensilage, sorgho, pois, ray-grass ;
- Et celles peu exigeantes, par exemple : blé tendre, avoine, seigle, maïs grain, soja, tournesol.

Il convient également de tenir compte de la nature des sols qui conditionne la biodisponibilité du phosphore pour la plante.

2.4.2 La disponibilité en phosphore dans les sols

La disponibilité du phosphore pour la plante (ou biodisponibilité ou encore phytodisponibilité) peut être estimée par différentes méthodes d'extraction :

- La méthode Dyer - NF X31-160. 1999. Qualité des sols - Détermination du phosphore soluble dans une solution à 20 g.l⁻¹ d'acide citrique monohydraté ;
- La méthode Joret-Hébert - NF X31-161. 1999. Qualité des sols - Détermination du phosphore soluble dans une solution d'oxalate d'ammonium à 0,1 M ;
- La méthode Olsen - NF ISO 11263. 1995. Qualité du sol - Dosage du phosphore - Dosage spectrométrique du phosphore soluble dans une solution d'hydrogénocarbonate de sodium.

La disponibilité du phosphore dépend notamment de la teneur en CaCO_3 , du pH, de la teneur en argile et de la teneur en carbone organique. La méthode de raisonnement de l'évaluation de biodisponibilité du phosphore actuellement proposée est basée sur Follain *et al.* (2009) et Denoroy *et al.* (2004) à partir des principes proposés par le Comifer (1993). Il s'agit d'affecter l'analyse du sol à une classe caractérisée par rapport à des valeurs-seuil notées L1 et L2 (tableau 12). Le seuil L1 est le seuil d'impasse pour les cultures faiblement exigeantes vis-à-vis du phosphore, c'est-à-dire qu'en l'absence de fertilisation en cet élément, toutes les cultures risquent une perte de rendement du fait de la disponibilité insuffisante de cet élément nutritif. Le seuil L2 est le seuil d'impasse pour les cultures exigeantes (il est donc, par définition, supérieur au seuil L1). Ceci signifie que pour une disponibilité en élément entre les seuils L1 et L2, seules les cultures exigeantes risqueront – en l'absence de fertilisation – une perte de rendement, et que pour une disponibilité supérieure à L2, aucune culture ne risque de perte de rendement.

Tableau 12. Méthode de raisonnement de l'évaluation de biodisponibilité du phosphore – Valeurs seuils de phosphore extraites du sol (L1 et L2, L1 < L2) pour déterminer une classe de biodisponibilité du phosphore du sol, dépendant des méthodes analytiques (Olsen, Joret-Hébert, Dyer) et des caractéristiques du sol : CaCO₃, pH, argile et carbone organique (Source : Denoroy *et al.*, 2004)

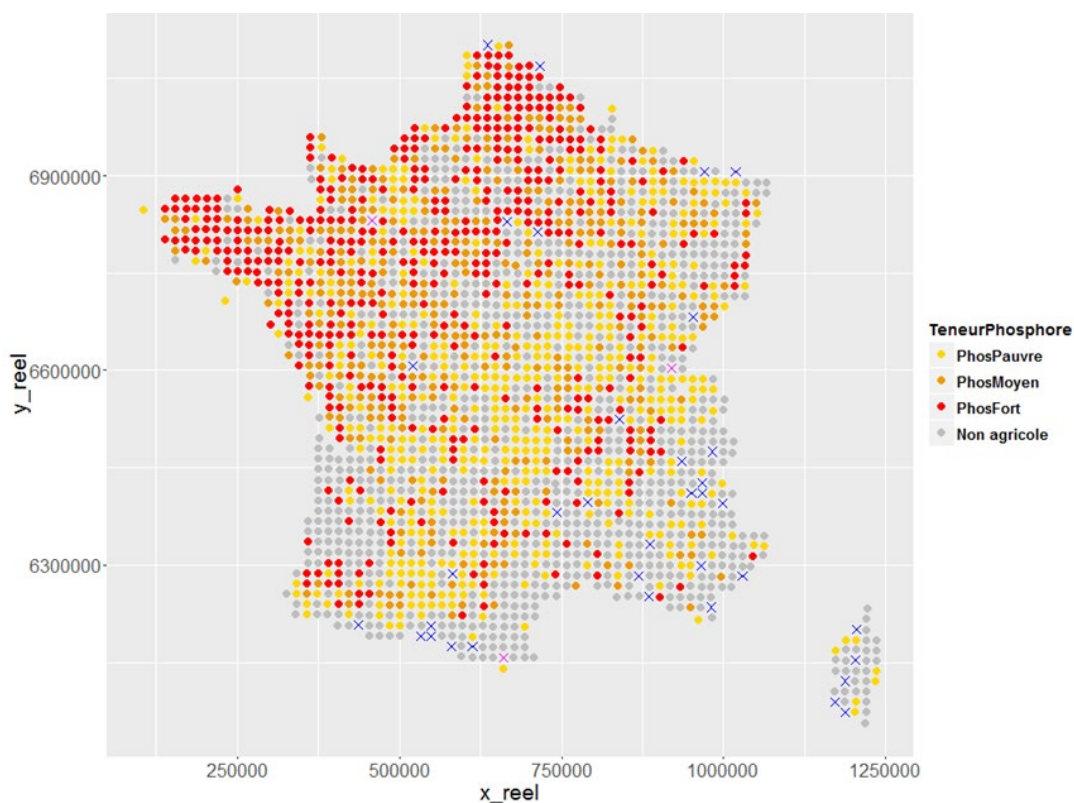
Méthode d'extraction du phosphore	CaCO ₃ (g.kg ⁻¹)	pH	Argile (g.kg ⁻¹)	Carbone organique (g.kg ⁻¹)	Valeurs seuils de phosphore extraites du sol (mg.kg ⁻¹)	
					L1	L2
Olsen (ISO 11263)	30 < < 800	7 < < 8.3	150 < < 800	> 5	50	100
			10 < < 150		45	90
	< 30	5 < < 8.3	40		70	
	150 < < 800	40	80			
Joret-Hébert (NFX 31-161)	30 < < 800	7 < < 8.3	150 < < 800	> 5	150	300
			10 < < 150		140	270
	<30	5 < < 8.3	130		250	
	150 < < 800	150	260			
Dyer (NFX 31-10)	<30	4 < < 9	0 < < 250	> 5	150	300
			> 250		180	400

La distribution des sols en France en fonction des seuils L1 et L2 a été calculée par l'INRA InfoSol à l'aide des données issues du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS - GIS SOL (Groupement d'intérêt scientifique Sol²⁰), figure 3). Les situations en France dans lesquelles le phosphore est :

- Faible ([P]sol < L1) représentent 37% des sols ;
- Moyen (L1 < [P]sol < L2) représentent 29 % des sols ;
- Fort ([P]sol > L2) représentent 34 % des sols.

²⁰ Le Groupement d'intérêt scientifique Sol (Gis Sol) a été créé en 2001 pour constituer et gérer un système d'information sur les sols de France et répondre aux demandes des pouvoirs publics et de la société au niveau local et national.

Le Gis Sol conçoit, oriente et coordonne l'inventaire géographique des sols, le suivi de leurs propriétés et l'évolution de leurs qualités, et gère le système d'information sur les sols. Le Gis Sol assure également la valorisation des données sur les sols de France, en cohérence avec les programmes européens.



PhosPauvre : nécessité de fertiliser toutes les cultures ($[P]_{sol} < L1$)

PhosMoyen : nécessité de fertiliser seulement les cultures exigeantes ($L1 < [P]_{sol} < L2$)

PhosFort : pas de nécessité de fertiliser ($[P]_{sol} > L2$)

Figure 3. Cartogramme pour les trois classes de teneur en phosphore assimilable pour les sols agricoles (cultures et prairies) (source : © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017)

Par ailleurs, la BDAT (Base de Données d'Analyse des Terres) du GIS SOL permet de renseigner l'évolution depuis plusieurs années de la biodisponibilité en phosphore des sols. Elle conclut que des diminutions assez importantes de disponibilité en phosphore sont constatées dans beaucoup de régions françaises (Saby *et al.*, 2016).

2.4.3 Les quantités d'engrais apportées aux sols

Les quantités d'engrais phosphatés apportées aux sols dépendent de la nature et de l'exigence des cultures ainsi que des réserves du sol. Ainsi, à partir de la connaissance de l'offre de phosphore du sol (estimée par la mesure de P échangeable) et des besoins de la plante (estimés par les analyses de végétaux et la prise en compte de l'exigence des cultures), il est possible de raisonner la fertilisation phosphatée. Celle-ci peut prendre différentes formes depuis des apports annuels systématiques (exemple : couples sols pauvres et plantes exigeantes) à des impasses tous les 2 ou 3 ans (exemple : couples sols riches et plantes peu exigeantes). Les bases du raisonnement de la fertilisation phosphatée, établies par le Comifer reposent sur les quatre critères principaux suivants :

- L'exigence des espèces cultivées (c'est-à-dire le potentiel de la plante à extraire du sol les éléments nutritifs) ;
- L'analyse de terre : phosphore échangeable (réalisée au laboratoire sur un échantillon de terre fine < 2 mm représentatif de la parcelle) ;
- Le passé récent de fertilisation (à savoir s'il y a eu une fertilisation régulière de la parcelle par l'agriculteur ou une impasse de longue durée) ;

- Et la restitution ou non des résidus de culture du précédent cultural (important pour le potassium car les résidus de végétaux peuvent en libérer rapidement des quantités significatives).

La dose d'apport conseillé exprimée en kg.ha⁻¹ est ainsi calculée en fonction d'un coefficient multiplicatif des exportations (ces coefficients ont été fixés par des experts pour faciliter ensuite les calculs de fertilisation raisonnée pour le grand nombre), du rendement prévu et de la teneur en P₂O₅ dans les exportations :

$$\text{Dose P}_2\text{O}_5 \text{ conseillé} = \text{coefficient multiplicatif des exportations} \times \text{rendement prévu} \times \text{teneur en P}_2\text{O}_5 \text{ dans les exportations}$$

Avec : Dose P₂O₅: kg.ha⁻¹

Rendement prévu : unité de rendement aux normes

Teneur en P₂O₅ dans les exportations : kg P₂O₅ par unité de rendement aux normes

Une grille de calcul des doses a été établie par le Comifer (tableau 13), considérant des coefficients à appliquer aux quantités d'éléments exportés prévisibles pour déterminer les quantités d'éléments à appliquer (Comifer grille de calcul P-K-Mg, 2009, <http://www.comifer.asso.fr/index.php/fr/publications/les-brochures.html>):

Tableau 13. Grille de calcul des doses de phosphore à apporter établie par le Comifer

Grille de calcul des doses de phosphore (P₂O₅) à apporter
Grille de coefficients multiplicatifs des exportations, appliqué à la récolte principale (grains le plus souvent)

Teneur du sol
Positionner la teneur par rapport aux seuils

P ₂ O ₅	Nb. d'années sans apport depuis la dernière fertilisation	Teneur du sol						
		Tenf.	Timp. -10%	Timp.	Timp. +10%	2x Timp.	3x Timp.	
Cultures très exigeantes Betterave sucrière Colza - Luzerne Pomme de terre	0	2.2	1.5	1.2	1.0	0.8	0	0
	1 an	3.3	2.0	1.5	1.2	1.0	0	0
	2 ans ou +	3.7	2.7	2.0	1.5	1.2	0.8	0
Moyennement exigeantes Blé / Blé - Blé dur Maïs fourrage - Pois Orge - R.G. - Sorgho	0	1.6	1.0	1.0	0	0	0	0
	1 an	1.8	1.2	1.0	1.0	0.8	0	0
	2 ans ou +	2.0	1.7	1.5	1.2	1.0	0.6	0
Cultures peu exigeantes Avoine - Blé tendre Maïs grain - Seigle Soja - Tournesol	0	1.3	1.0	0.8	0	0	0	0
	1 an	1.6	1.0	1.0	0	0	0	0
	2 ans ou +	1.6	1.2	1.0	1.0	0.8	0	0

Teneur faible ← Teneur élevée
 Timp. = Teneur du sol

Cette grille P s'applique à toutes les cultures y compris fourragères, à leur récolte principale, mais ne s'applique pas aux résidus à enlèvement facultatif (pailles).
 Si les résidus de la culture précédente sont récoltés (paille, fanes...), un supplément de dose est proposé selon la règle suivante :

- pas de supplément en cas de sol à teneur élevée (teneur > Timp) qu'il y ait un conseil de dose nulle ou non d'après la grille ;
- le supplément correspond à l'exportation de P₂O₅ des pailles sur la culture qui suit dans les autres cas (teneur < Timp).

Supplément de kg P₂O₅/ha sur la culture qui suit = Masse de résidus récoltés (t/ha) × teneur en kg P₂O₅/t

Source Comifer : <http://www.comifer.asso.fr/images/publications/livres/tablesexportgrillescomifer2009.pdf>

⇒ Au regard, d'une part de l'intérêt agronomique de l'épandage sur les sols agricoles des matières fertilisantes et d'autre part, de l'identification des matières fertilisantes comme source de contamination environnementale et d'impact sanitaire par l'apport de cadmium dans la chaîne alimentaire, l'Anses est mandatée pour proposer des niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles et la contamination des productions végétales, et de facto l'exposition alimentaire du consommateur.

2.5 Les enjeux liés à la proposition d'un seuil en cadmium dans les MFSC permettant de maîtriser la pollution en cadmium des sols agricoles, la contamination des productions agricoles et l'exposition du consommateur

La présence de substances chimiques (éco)toxiques dans les divers compartiments de l'environnement, tel le cadmium, induit des effets adverses qui ont amené la réglementation européenne à se renforcer en 2007 avec le règlement REACH (<https://echa.europa.eu/fr/reach>). Ce règlement, outre les aspects techniques liés à une meilleure caractérisation des substances chimiques et de leur réactivité, aborde le sujet de façon très globale sur tout le cycle de vie des substances (ou articles, mélanges) depuis leur fabrication, leur utilisation et mise en décharge. De plus, les aspects de communication auprès du public sont également abordés. Cette saisine sur l'exposition au cadmium s'intègre ainsi dans cet esprit d'approche globale et d'amélioration continue.

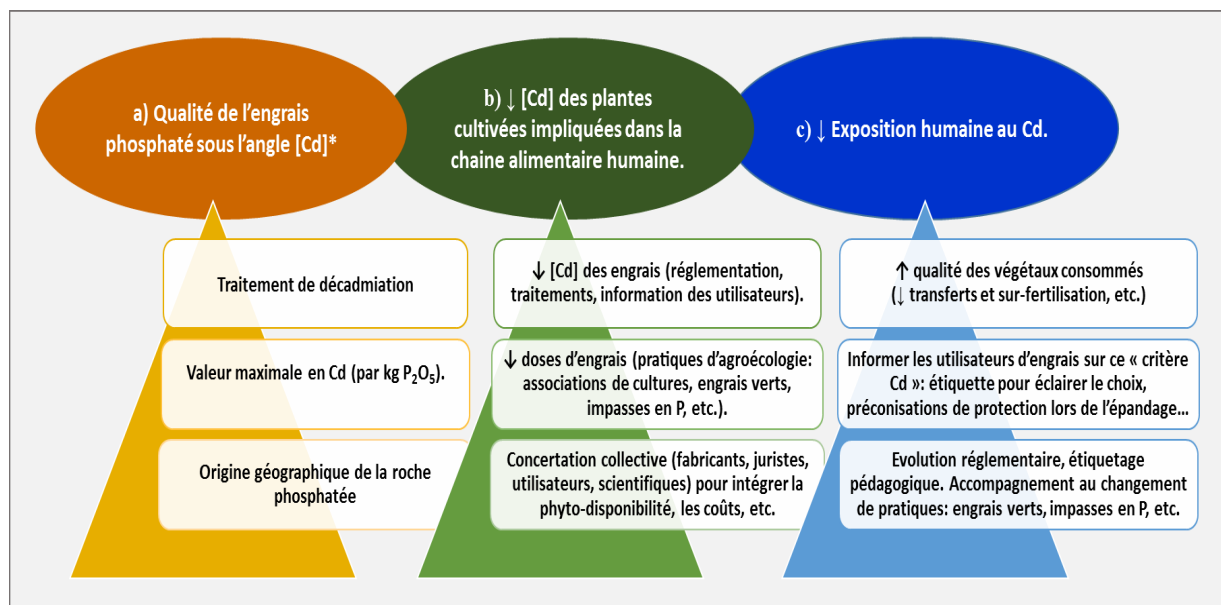
Des verrous et des opportunités existent dans le cadre des discussions qui peuvent se produire entre les divers acteurs impliqués dans la recherche, la fabrication, la vente, et l'utilisation, notamment dans le cas des engrais phosphatés commercialisés, sources majoritaires d'apport en cadmium.

Ces discussions favorisent les interactions entre les différents acteurs pour effectivement réduire les risques environnement-santé liés à l'utilisation des engrais phosphatés commercialisés contenant du cadmium.

Pour chaque niveau de la chaîne, il y a un certain nombre de critères à connaître et de questions à se poser afin d'appréhender de façon globale la question de la qualité des intrants phosphatés au regard de leur potentiel risque d'apport en cadmium. Par exemple, pour la phase de fabrication industrielle des engrais phosphatés :

1. L'origine des phosphates a une influence sur leur teneur et les formes chimiques du cadmium (spéciation chimique),
2. Les étapes de préparation du produit peuvent influencer sur les teneurs en cadmium : taille des particules solides, éléments complémentaires apportés, pH...

Les enjeux prioritaires des acteurs sont différents, le vocabulaire aussi. C'est pourquoi les rencontres multiacteurs sont cruciales pour promouvoir la construction collective de la qualité renforcée des engrais phosphatés. Ces réflexions sont synthétisées par la figure 4 suivante (Dumat, 2018).



* D'un point de vue scientifique, en complément de la concentration totale en cadmium, la question de la formulation de l'engrais phosphaté et de la spéciation chimique du cadmium qui influencent sa phytodisponibilité peut être posée. Cette phytodisponibilité du cadmium étant également fortement influencée par les caractéristiques du sol et de la plante cultivée sur ce sol qui reçoit des engrais phosphatés.

Figure 4. Principaux facteurs influençant : (a) la qualité d'un engrais phosphaté industrialisé, (b) ainsi que la contamination des végétaux et *in fine* (c) l'exposition humaine au cadmium dans un contexte d'utilisation des engrais phosphatés industrialisés présentant des traces de cadmium

- ⇒ Dans ce contexte, le but de cette saisine est d'étudier la révision de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de maîtriser la pollution en cadmium des sols agricoles, la contamination en cadmium des productions agricoles et l'exposition du consommateur au cadmium ; cela s'inscrivant dans une politique de maîtrise de la contamination environnementale liée à l'apport en cadmium par les matières fertilisantes.

L'expertise de cette question posée dans la saisine s'est appuyée dans un premier temps sur l'analyse critique des travaux européens sur les valeurs limites en cadmium dans les fertilisants.

2.6 Analyse critique des travaux européens sur les valeurs limites en cadmium dans les fertilisants

L'expertise relative à la proposition de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes s'est appuyée sur les travaux européens existants sur le sujet, notamment :

- Le rapport « Revisiting and updating the effect of phosphate fertilizers to cadmium accumulation in European agricultural soils » de Smolders et Six, publié en 2013.
- Le document « Final Opinion on new conclusion regarding future trends of cadmium accumulation in EU arable soils » du Scientific Committee on Health and Environmental Risks (SCHER), document adopté le 06 janvier 2016 suite à la réunion plénière du 27 novembre 2015.
- Le rapport « Kadmiumhalten måste minska – för folkhälsans skull En riskbedömning av kadmium med mineralgödsel i fokus Rapport från ett regeringsuppdrag. 2011 » de l'agence suédoise des produits chimiques (KEMI) publié en 2011.

Ces travaux ont fait l'objet d'une analyse critique par les experts rapporteurs, présentée ci-dessous. Par ailleurs, cette analyse a fait l'objet d'une note transmise durant l'expertise de cette saisine aux tutelles le 18 mai 2017.

2.6.1 Rapport de Smolders et Six (2013) « Revisiting and updating the effect of phosphate fertilizers to cadmium accumulation in European agricultural soils »

Le document de Smolders et Six (2013) est une étude financée par les industriels de la fertilisation minérale (Fertilizer Europe). Cette étude a pour objectif d'étudier l'effet des engrais phosphatés sur l'accumulation de cadmium dans les sols agricoles européens, en actualisant l'approche « mass-balance » réalisée par le CSTEE en 2002²¹ avec des données plus récentes. Le principe de cette approche est d'établir une valeur limite en cadmium dans les engrais phosphatés commercialisés ne menant pas à une accumulation du cadmium dans les sols agricoles, sur la base de la différence entre les entrées et les sorties en cadmium du sol.

La concentration en cadmium dans les sols dans l'étude de Smolders et Six est modélisée pendant 100 ans, liée au comportement persistant du cadmium dans les sols.

Les voies d'entrée en cadmium dans les sols agricoles européens considérées dans cette étude sont les suivantes :

- Les fertilisants minéraux,
- Les dépôts atmosphériques,
- Les boues de stations d'épuration (STEP),
- Les effluents d'élevage,
- La chaux.

Ces trois dernières sources (dont leur intégration à l'approche « mass-balance » est considérée comme une amélioration comparée à celle du CSTEE en 2002) sont fixées dans cette étude et n'évoluent pas selon les besoins agronomiques des sols. Les dépôts atmosphériques sont également fixes dans cette étude et définis notamment par le système EMEP (modélisation des dépôts à partir des émissions). Les eaux d'irrigation, pouvant constituer une source d'apport en cadmium dans le sol, ne sont pas prises en compte en tant que voie d'entrée en cadmium dans le sol agricole dans ce travail.

Les voies de sorties en cadmium dans les sols agricoles européens considérées dans cette étude sont : la lixiviation et l'export par les cultures.

Une part importante des sorties en cadmium du sol s'effectue vers les eaux superficielles et souterraines. Il apparaît que le transfert de cadmium aux eaux superficielles n'est pas suffisamment pris en compte.

Dans cette étude, la teneur moyenne en cadmium des sols est estimée pour l'Europe à 0,3 mg.kg⁻¹ et varie dans les simulations entre 0,25 et 0,6 mg.kg⁻¹.

Les itinéraires culturaux considérés sont une monoculture de blé, une monoculture de pomme de terre et une rotation blé/pomme de terre. Dans la modélisation, les apports de fertilisants minéraux sont de l'ordre de 21 et 45 kg P₂O₅.ha⁻¹.an⁻¹ respectivement pour le blé et la pomme de terre.

Le modèle établi par les auteurs, prenant en compte un schéma européen, détermine des teneurs en cadmium dans les matières fertilisantes permettant d'observer, sur une durée de 100 ans, une diminution croissante de l'accumulation du cadmium dans les sols agricoles avec des fertilisants minéraux de moins en moins concentrés en cadmium.

²¹ CSTEE (2002). Scientific Committee on Toxicity, Ecotoxicity and the Environment Brussels, C2/AST/csteeop/Cadmium in fertilizers 24092002/D(02).

Les paramètres de la modélisation semblent adaptés pour une approche européenne moyenne. En revanche, la situation française n'est pas entièrement comparable à celle-ci, notamment en termes :

- D'apport de fertilisants sur les sols,
- De concentrations en cadmium dans les fertilisants,
- De teneurs en cadmium dans les sols,
- De la gamme de pH des sols.

En effet, l'étude de Smolders et Six considère des apports moyens de fertilisants minéraux sur les sols européens de $22 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ et estime que la concentration moyenne en cadmium dans les fertilisants est de $36 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg}^{-1}$ de P_2O_5 . Cette étude ne tient pas compte des spécificités d'emploi des engrais liés à un pays qui varient selon les pratiques agricoles et le fournisseur d'engrais phosphatés. En France, les engrais phosphatés proviennent principalement des pays d'Afrique du Nord dans lesquels les engrais phosphatés sont fabriqués à partir de roches sédimentaires riches en cadmium pouvant mener à des teneurs en cadmium dans le produit final au-delà de $60 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg}^{-1}$ P_2O_5 ²². Par ailleurs, le document de Smolders et Six (2013) ne fournit pas les teneurs en cadmium des engrais phosphatés tels que commercialisés actuellement et pour renseigner celles-ci, l'étude s'appuie sur la publication de Nzigueba & Smolders (2008)²³. De façon générale, il est nécessaire que les industriels de la fertilisation minérale fournissent les données à leur disposition ou que de telles informations soient collectées afin d'avoir plus d'assurances quant à la pertinence de la gamme choisie dans les simulations, même si ces informations apparaissent réalistes dans les situations les plus courantes.

Sur des sols bien pourvus en phosphore, les quantités d'engrais apportées dans les simulations de l'étude de Smolders et Six (2013) sont certes cohérentes avec les pratiques agronomiques. Mais, en France, elles peuvent être du double ou du triple sur des sols moins riches en phosphore (jusqu'à au moins 68 et $106 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1}$ en apport régulier respectivement pour le blé²⁴ et la pomme de terre²⁵). Ces sols peu pourvus en phosphore représenteraient un tiers des situations en France (données du RMQS²⁶ - cf section 2.4.2).

Concernant la nature des sols, au moins deux données importantes sont à considérer : la teneur en cadmium et le pH qui a un effet sur le transfert du cadmium vers les plantes (phytodisponibilité). La teneur moyenne en cadmium utilisée dans l'étude de Smolders et Six correspond à la moyenne européenne issue de la base de données FOREGS²⁷ (atlas géochimique) qui n'est pas réellement adaptée pour les sols agricoles et les prairies. La gamme de teneurs en cadmium dans les sols qui est prise en compte dans les simulations apparaît trop restrictive. Certains sols européens peuvent présenter des teneurs plus fortes soit à la suite d'apports réguliers de fertilisants, soit en raison du fond géochimique lié à la richesse de la roche mère. Si, pour la France, les bases de données nationales proposent une teneur moyenne en cadmium comprise entre $0,3$ et $0,4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, il existe des valeurs bien plus importantes. Ainsi, la distribution en cadmium observée dans les sols en métropole (données du RMQS¹⁴) est la suivante :

- 68% des sols ont une teneur en cadmium inférieure à $0,3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;

²² European commission (2016). Limits for cadmium in phosphate fertilisers. Accompanying the document Proposal for a Regulation of the European Parliament and of the Council laying down rules on the making available on the market of CE marked fertilizing products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009.

²³ Nzigueba G., Smolders E. (2008). Inputs of trace elements in agricultural soils via phosphate fertilizers in European countries. *Sci Total Environ*, 390, 53-57.

²⁴ <http://fertilisation-edu.fr/cultures-fiches-pratiques/ble.html>

²⁵ <http://fertilisation-edu.fr/cultures-fiches-pratiques/pomme-de-terre.html>

²⁶ Réseau de mesure de la qualité des sols : <https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmqs-34>

²⁷ <http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/> et http://sigminesfrance.brgm.fr/geoch_foregs.asp

- 25% des sols ont une teneur en cadmium entre 0,3 et 0,7 mg.kg⁻¹ ;
- et 7% des sols ont une teneur en cadmium supérieure à 0,7 mg.kg⁻¹.

La valeur maximale en cadmium dans les sols, testée dans les scénarios de l'étude de Smolders et Six étant de 0,6 mg.kg⁻¹, elle ne couvre pas toutes les situations rencontrées en France.

Concernant le pH, les auteurs proposent une gamme de pH allant de 4,5 à 7,5. Les données du RMQS¹⁴ établissent que :

- 50% environ des valeurs françaises sont inférieures à un pH de 6,5 ;
- 20% des sols présentes un pH compris entre 6,5 et 7,5 ;
- et que le reste, soit 30% des sols, soient supérieurs à un pH de 7,5.

Ces dernières situations ne sont pas prises en compte dans les simulations alors que des teneurs en cadmium importantes peuvent être présentes dans des sols calcaires (5,5% des sols en France présentent un pH supérieur à 7,5 et des teneurs en cadmium supérieures à 0,7 mg.kg⁻¹). Ces situations sont cependant moins à risque pour la santé car lorsque le pH est basique, le cadmium est moins mobile et transfère donc moins vers les végétaux ou l'eau. Cependant, il s'accumule dans les sols.

Ainsi, la modélisation mise en œuvre par Smolders et Six, bien que mathématiquement solide, n'est pas entièrement représentative de toutes les conditions possibles pouvant être rencontrées en France (elle se base bien souvent sur des estimations moyennes européennes, ne prenant pas en compte des cas particuliers qui pourraient être défavorables). De plus, la dérivation du seuil en cadmium dans le document de Smolders et Six (2013) est basée uniquement sur l'accumulation en cadmium dans les sols et ne prend pas en compte le niveau de risque pour la santé humaine à partir de la chaîne alimentaire. La dérivation de ce seuil devrait s'appuyer sur une évaluation du risque utilisant une approche probabiliste et tenant compte de toutes les sources de cadmium ainsi que de tous les paramètres liés à son transfert.

2.6.2 Rapport du Scientific Committee on Health and Environmental Risks, SCHER (2016) « Final Opinion on new conclusion regarding future trends of cadmium accumulation in EU arable soils »

Le document du SCHER (2016) présente une analyse du travail de Smolders et Six (2013).

Parmi les points critiques notamment indiqués par le SCHER :

- le choix de la concentration moyenne de cadmium dans les sols,
- la gamme de pH du sol utilisée,
- le choix des pourcentages en matière organique dans les sols,
- l'apport en cadmium par les dépôts atmosphériques,
- l'apport en cadmium par les engrais ainsi que les effluents d'élevages et les boues de STEP.

Concernant le choix de la concentration moyenne de cadmium dans les sols par l'utilisation de la base FOREGS, le SCHER signale que la base FOREGS ne concerne pas les sols agricoles.

Quant aux valeurs de pH considérées dans l'étude de Smolders et Six, selon le SCHER, des gammes de pH du sol plus étendues pourraient être utilisées.

En plus du pH, afin de prendre en compte la variabilité des sols européens, des pourcentages en carbone organique plus faibles devraient être considérés en raison du fait que les sols européens sont pauvres en carbone organique (< 2%). Ces paramètres vont moduler la disponibilité du cadmium et son transfert du sol vers les plantes. De façon générale, plus le pH d'un sol est acide, plus les pourcentages en carbone organique du sol sont faibles, et plus le cadmium est mobile. Ces deux paramètres (pH et teneur en carbone organique) contrôlant en grande partie la disponibilité environnementale du cadmium et donc les transferts, les experts rapporteurs nommés

sur la saisine notent qu'il importe ainsi de prendre en compte des situations plus défavorables pour estimer ce qui peut être transféré à l'Homme par l'alimentation.

Pour les dépôts atmosphériques, le SCHER indique qu'il serait pertinent d'utiliser une valeur augmentée d'apport en cadmium en considérant la valeur pire cas de $1,3 \text{ g Cd}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$, supérieure à la valeur maximale de $0,7 \text{ g Cd}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ considérée par Smolders et Six (2013).

Le SCHER juge également que les apports de $0,01 \text{ g Cd}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ par les effluents d'élevage ou de $0,05 \text{ g Cd}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ par les boues de STEP sont faibles.

Le SCHER estime que la concentration moyenne de cadmium dans les fertilisants de $36 \text{ mg Cd}\cdot\text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ est acceptable.

Le SCHER considère que des cas réalistes maximaux auraient pu être considérés, notamment pour les apports d'engrais sur céréales et pommes de terre puisque les valeurs moyennes européennes cachent des disparités importantes.

L'ensemble des critiques émises par le SCHER va dans le même sens que celles faites par les experts rapporteurs à l'analyse critique du document de Smolders et Six de 2013 sur la pertinence d'un schéma européen unique pour l'évaluation. Le travail de Smolders et Six (2013) a l'avantage de s'intéresser à l'ensemble de l'Europe, mais ne prend pas suffisamment compte des spécificités locales en terme de caractéristiques des sols ou encore de pratiques d'apport. Ces remarques montrent qu'il est indispensable de compléter ces simulations par des situations « pire cas » incluant les combinaisons les plus défavorables des différents facteurs cités. Il en résulte aussi que l'approche moyenne européenne n'est pas représentative du contexte français en 2017.

Même si les hypothèses de Smolders et Six (2013) sont réalistes et semblent couvrir la majorité des situations courantes, il importe que les cas les plus défavorables soient mieux envisagés. Il peut en effet y avoir des situations locales qui conduiraient à une surexposition au cadmium par le jeu de combinaisons de sol/plante/apports plus défavorables. L'étude récente de Sterckeman *et al.* (2018a) confirme ce constat et indique que l'approche « mass-balance » sur la base d'un schéma unique européen (Smolders et Six, 2013) ne tient pas compte des situations les plus défavorables, pouvant notamment être observées sur le sol français.

Il convient de s'assurer que des populations de consommateurs ne se trouvent pas surexposées au cadmium par le jeu de telles combinaisons.

Ceci semble pertinent dans la mesure où les conclusions issues de l'EAT2 montrent que des fractions significatives de consommateurs sont surexposées au cadmium *via* les apports alimentaires. Or, les contaminations alimentaires sont moyennées dans l'étude de Smolders et Six, ce qui a mathématiquement tendance à « écraser » les extremums.

2.6.3 Rapport de l'agence suédoise des produits chimiques (KEMI) (2011). « Kadmiumhalten måste minska – för folkhälsans skull En riskbedömning av kadmium med mineralgödsel i fokus Rapport från ett regeringsuppdrag.2011 »

Ce rapport est principalement rédigé en suédois avec des parties traduites en anglais.

Cette étude découle de l'observation qu'une partie de la population suédoise présentait des concentrations en cadmium supérieures à la valeur limite pour laquelle des effets toxiques sont observés. Le but était de réduire l'exposition humaine au cadmium et d'identifier les principaux scénarios d'exposition permettant de proposer des mesures ciblées. Les préconisations dans cette étude concernent la réduction des quantités de cadmium dans les sols liées à l'utilisation des engrais phosphatés et aussi aux apports atmosphériques.

C'est également une approche « mass balance » qui est utilisée par le KEMI. Les apports de cadmium au sol considérés dans cette étude sont les dépôts atmosphériques (entre $0,3$ et $0,4 \text{ g Cd}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$), les engrais minéraux et la chaux ($40 \text{ mg Cd}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$), tandis que les exports de cadmium du sol considérés sont la lixiviation et les cultures. Les scénarios d'exposition considèrent des ingestions de blé et de pomme de terre ainsi que la richesse du sol en cadmium.

Les teneurs en cadmium estimées pour les 5 grands types de sols suédois identifiés dans l'étude sont en moyenne inférieures à $0,3 \text{ mg.kg}^{-1}$. Cependant, ces sols présentent des pH acides, plus faible d'une unité que la valeur moyenne européenne, ce qui tend à favoriser le transfert vers les plantes. Concernant les apports de phosphore au sol, ils dépendent de la nature des sols et des cultures. Ces apports sont compris entre environ 10 et $50 \text{ kg P}_2\text{O}_5\text{.ha}^{-1}$ et sont proches des simulations réalisées par Smolders et Six (2013). Les résultats obtenus dans cette étude indiquent qu'il n'y a pas (ou très peu) d'augmentation de la concentration en cadmium du sol sur 100 ans si la teneur en cadmium dans les engrais minéraux ne dépasse pas $25 \text{ mg Cd.kg}^{-1} \text{ P}$ (environ $11 \text{ mg Cd.kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$). Il est observé une augmentation de la concentration en cadmium dans le sol pouvant aller jusqu'à 40-50% avec des teneurs en cadmium au-dessus de $50 \text{ mg Cd.kg}^{-1} \text{ P}$ (environ $22 \text{ mg Cd.kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$) dans les engrais minéraux.

Cette étude est réalisée dans le contexte environnemental, social et économique suédois et ne peut être transposée directement à la situation française où des pH et des teneurs en cadmium des sols différents sont observés, tout comme les apports d'engrais, de boues de STEP ou d'effluents d'élevage. Mais, celle-ci montre qu'une baisse d'apport au sol du cadmium réduit les concentrations en cadmium observées dans les sols. Le rapport du KEMI rapporte plusieurs observations contradictoires de terrain dans sa discussion et conclut que l'ajout de quantités significatives de cadmium avec les engrais phosphatés fera à long terme augmenter les concentrations de cadmium dans le sol et très probablement dans les cultures.

Par ailleurs, il est à noter que suite à la mise en place d'une réglementation sur le cadmium dans les engrais phosphatés en Suède, les concentrations actuellement observées dans les engrais sont plus faibles que la moyenne européenne avec, selon le KEMI, des concentrations moyennes actuellement observées dans les engrais de $12 \text{ mg Cd.kg}^{-1} \text{ de P}$ (environ $5,2 \text{ mg Cd.kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$), soit 6 fois moins que la moyenne européenne considérée par Smolders et Six ($36 \text{ mg Cd.kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$).

2.6.4 Bilan

L'analyse critique des documents européens (KEMI, 2011; Smolders et Six, 2013 ; SCHER, 2016) confirme la nécessité de limiter l'apport en cadmium dans les sols agricoles afin de limiter les expositions du consommateur, notamment par l'intermédiaire d'une diminution des seuils en cadmium dans les matières fertilisantes.

En ce qui concerne la situation française, selon la publication de Belon *et al.* (2012), les apports de cadmium au sol agricole sont majoritairement liés aux engrais phosphatés et aux effluents d'élevage (cf. section 2.3.4). Une voie qui semble à privilégier est la limitation des apports en cadmium au sol par les engrais phosphatés commercialisés, source principale de cadmium. La qualité de ces derniers peut être d'avantage maîtrisée que celle des effluents d'élevage plus complexes et moins renseignés, qui doivent cependant faire l'objet d'une attention soutenue.

- ⇒ Ainsi, au regard de cette analyse, les rapporteurs jugent nécessaire la réalisation de travaux pour évaluer au cours du temps en fonction des apports en cadmium dus aux engrais phosphatés l'évolution de la teneur en cadmium dans les sols français, la contamination des productions végétales et *de facto*, l'exposition alimentaire associée, en tenant compte des spécificités françaises. Ce travail devrait permettre de répondre de façon plus pertinente et précise à la saisine et proposer une valeur maximale en cadmium dans les matières fertilisantes utilisables en France. Ce travail se focalisera prioritairement sur l'emploi des engrais phosphatés commercialisés, source majoritaire d'apport en cadmium dans les sols disposant de données maîtrisées et scientifiques dont la qualité et la quantité permettront de bâtir un modèle, tout en traitant autant que possible les autres voies d'apport.

2.7 Etat de l'art du transfert du cadmium depuis les apports dans les sols agricoles jusqu'à l'exposition du consommateur en vue de la proposition de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes

2.7.1 Schéma conceptuel

Compte tenu de l'étendue de la question 3 posée dans le cadre de cette saisine, les différents aspects de la problématique, dans l'optique de la construction d'un modèle mathématique, ont été synthétisés dans un schéma conceptuel (figure 5). En effet, la question posée considère une source, l'apport en cadmium *via* les matières fertilisantes et plusieurs cibles : la contamination des sols agricoles, la contamination des productions végétales et, *in fine*, l'exposition alimentaire du consommateur. Le schéma conceptuel permet de visualiser le transfert du cadmium le long de la chaîne alimentaire, depuis la source jusqu'aux cibles et d'identifier les paramètres clés liés à ce transfert.

La réalisation d'un tel schéma conceptuel a reposé sur un travail bibliographique résumé ci-dessous.

La contamination du sol par le cadmium résulte de son origine naturelle et aussi des apports anthropiques liés aux diverses activités humaines et aux pratiques agricoles. En l'occurrence, un sol agricole peut être contaminé en cadmium à la suite d'un épandage de matières fertilisantes, en fonction des pratiques agricoles et de la qualité du produit épandu. De plus, les eaux d'irrigation peuvent constituer une voie d'entrée, jugée mineure, de cadmium dans les sols. Une autre source d'apport en cadmium qui n'est pas à sous-estimer en raison des activités anthropiques est le dépôt atmosphérique (Xiong *et al.*, 2014a ; Schreck *et al.*, 2012). Par ailleurs, les paramètres du sol, notamment le pH, vont moduler la disponibilité du cadmium et son transfert racinaire.

Les sorties du cadmium du sol se font essentiellement par l'intermédiaire des cultures et de la lixiviation. L'érosion des sols de surface provoque le transfert de particules fines riches en cadmium vers les eaux superficielles, dans des proportions qui ne sont pas à négliger (Denaix *et al.*, 2002).

Les denrées d'origine végétale peuvent être contaminées en cadmium en raison de la présence de celui-ci dans les sols agricoles résultant d'une origine naturelle et d'apports anthropiques. En effet, le cadmium apporté dans les sols est absorbé par la plante, constituant ainsi un contaminant de la chaîne alimentaire. Ce transfert sol-plante, principalement par les racines des plantes (et aussi parfois par les parties aériennes), est influencé ou modulé par de nombreux paramètres liés au type d'intrant agricole apporté, à la physiologie de la plante (qui peut être plus ou moins accumulatrice), elle-même variable en fonction de l'espèce et de la variété et aux facteurs relatifs à la typologie ou à la physico-chimie des sols. Ce transfert sol-plante se caractérise par le terme de phytodisponibilité correspondant à l'aptitude d'un élément à passer d'un compartiment du sol à la plante, de façon dépendante aux relations qui existent entre l'espèce végétale et le sol.

L'alimentation constitue chez l'Homme la voie majeure d'exposition au cadmium hors tabagisme (Efsa, 2009 et 2012). Le consommateur est exposé au cadmium par la consommation de denrées alimentaires potentiellement contaminées en cadmium, résultant de la consommation de denrées d'origine végétale à l'état transformé ou non, et aussi de denrées alimentaires d'origine animale *via* des animaux de rente exposés au cadmium par leur alimentation et le sol.

Les différents paramètres impliqués le long du transfert de cadmium depuis la source, l'épandage agricole de matières fertilisantes, jusqu'aux cibles, les sols, les productions végétales et le consommateur, tenant compte des spécificités françaises et à intégrer dans l'évaluation sont décrits dans les sections ci-après.

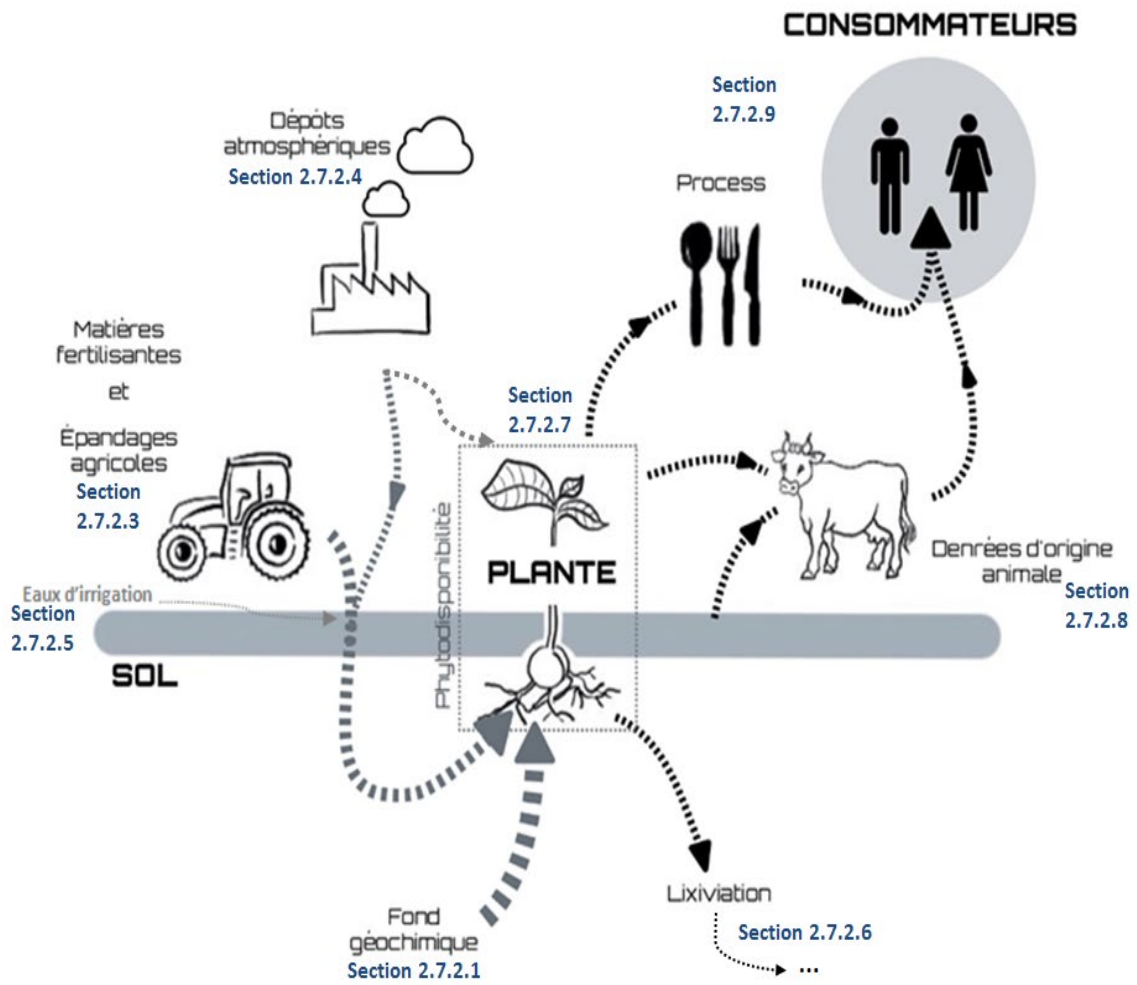


Figure 5. Transfert du cadmium depuis les sources environnementales jusqu'au consommateur

2.7.2 Etat de l'art : fonds géochimique, apports en cadmium par les différentes sources, transferts du cadmium vers les eaux, les végétaux et les animaux, et exposition humaine

2.7.2.1 Fond pédo-géochimique et teneurs habituelles

Les sols se forment aux dépens des roches (exemple : basaltes, granites, grès, micaschistes, calcaires, marnes et argilites) ou des formations superficielles (telles les alluvions, les moraines, les formations de pente, les loëss). Chaque sol hérite de son matériau parental un certain nombre de propriétés majeures, notamment sa composition géo-chimique initiale. Les teneurs en ETM mesurées aujourd'hui dans les sols²⁸ résultent donc d'abord de processus naturels : une composition chimique initiale héritée du matériau géologique dont le sol est issu, plus ou moins modifiée ensuite par l'évolution pédogénétique et la différenciation d'horizons en absence de tout apport d'origine humaine. La concentration pédo-géochimique naturelle (CPGN) résulte de cet état initial.

D'un endroit à un autre du territoire, cette CPGN varie en fonction de la nature du matériau parental (héritage), de l'histoire géologique locale, du type et de la durée de la pédogenèse d'où la nécessité de prendre en compte son niveau local. Concernant plus particulièrement le cadmium, en France, deux catégories de situations sont responsables de teneurs naturelles élevées ou très élevées en cadmium dans certaines roches (Baize *et al.*, 1999). Quatre zones ont été particulièrement étudiées pour cela : le Haut-Jura (Suisse et France), le premier plateau du Jura (France), la Bourgogne (régions d'Avallon et de Clamecy) et la Charente (région de Ruffec). Ces anomalies géochimiques positives se retrouvent ensuite dans les sols, conservées ou amplifiées (par accumulation relative) liés à :

- Des minéralisations locales ou généralisées affectant des roches sédimentaires ou métamorphiques ne présentant pas initialement de teneurs importantes. Le cadmium est alors accompagné de nombreux autres éléments traces (Zn, Pb, Cr, Co, Ba, As etc.). C'est le cas des « gîtes sédimentaires stratiformes » dont le meilleur exemple est le calcaire sinémurien qui affleure au nord et au nord-est du Morvan (Terre Plaine de l'Yonne – Auxois en Côte d'Or). Les sols, directement issus de l'altération de ce calcaire, s'avèrent très chargés en ETM et, notamment en cadmium. De telles situations sont fréquentes en bordures du Massif central (Aveyron, Lozère, Ardèche, Gard) et particulièrement dans des zones de failles.
- Des roches calcaires s'avérant être relativement riches en cadmium : les craies de Champagne, certains calcaires crayeux du crétacé en Charente, de nombreux calcaires durs jurassiques du Jura, de Bourgogne, du Berry, du Poitou... ainsi que les calcaires tertiaires du Vexin. Des études récentes montrent que, en ce qui concerne le Jurassique, les époques bajociennes et oxfordiennes sont nettement anormales, en relation avec des cycles géochimiques planétaires. Au cours de la décarbonatation

²⁸ Mesure des ETM dans les sols : La mesure de la concentration totale des éléments en traces dans les sols peut être faite directement sur le solide (exemple : spectrométrie de fluorescence X) ou plus couramment par mise en solution suivie d'un dosage de l'élément en phase liquide.

La mise en solution qui permet la dissolution complète des minéraux les plus résistants, est généralement obtenue par fusion alcaline (NF ISO 14869-2) ou par digestion à chaud à l'aide d'un mélange d'acides comportant de l'acide fluorhydrique (HF) (NF ISO 14869-1). Il est également possible d'utiliser l'eau régale (ER) (mélange d'acide chlorhydrique et d'acide nitrique) (NF ISO 11466) mais cette méthode ne conduit pas à une mise en solution totale. Ainsi, les teneurs en ETM extraits par l'eau régale peuvent représenter entre 60 et 96% de la teneur obtenue par l'extraction avec l'acide fluorhydrique en fonction de l'élément considéré et/ou de l'échantillon de sol.

Le cadmium est un des rares éléments extrait en quantités quasiment identiques quelle que soit la méthode d'extraction utilisée, contrairement au nickel ou au chrome par exemple. Le dosage des ETM dans les extraits liquides obtenus est généralement réalisé par des techniques de spectrométrie d'émission atomique en plasma induit d'argon, d'absorption atomique ou de masse.

progressive de ces roches, le cadmium a généralement tendance à s'accumuler dans les sols résiduels.

A ces valeurs d'origine naturelle s'ajoutent des apports liés à l'activité humaine comme par exemple les intrants agricoles (exemple : fertilisants minéraux, boues, composts, produits de traitement, cf. section 2.7.2.3) ou les retombées atmosphériques (cf. section 2.7.2.4). Compte tenu de ces apports anthropiques, la notion de CPGN ne s'applique plus puisqu'à l'héritage pédogéologique initial sont venus s'ajouter divers apports d'ETM. Baize (2009) a proposé l'expression « teneurs agricoles habituelles » (TAH) pour tenir compte de ces apports. Ces TAH sont donc les gammes de concentrations observées le plus fréquemment dans les horizons de surface des sols agricoles soumis à des pratiques agricoles usuelles, en l'absence de pollutions industrielles ou minières ou de contaminations majeures. Ce concept intègre donc une notion statistique de fréquence, même s'il n'est pas facile de délimiter où s'arrêtent les pratiques agricoles usuelles et où commencent les pratiques inhabituelles ou excessives.

Concernant le cadmium, les sols agricoles français sont à peu près tous plus ou moins contaminés en surface par du cadmium provenant des engrais minéraux phosphatés et/ou des retombées atmosphériques. Des épandages de boues d'épuration et/ou de « gadoues fraîches » (dans les années 1960 à 1980, avant la mise en place d'une réglementation stricte) et les émissions des activités minières et de la métallurgie des métaux non ferreux sont également des causes de contaminations plus locales.

En Europe et en France, plusieurs bases de données existent (tableau 14) et permettent de proposer des valeurs habituellement rencontrées dans les sols (tableau 15).

Tableau 14. Description de bases de données disponibles concernant les concentrations en ETM dans les sols

Nom de la base de données	Nombre de sites inclus dans la base	Types de sols : Agriculture (A) ou Forêt (F),	Mise en solution (*)	Localisation	Critères de sélection des sites
Aspité 2002 (a)	1 200	A et F	HF	Moitié nord de la France	Critères divers dont recherche
BDETM (b)	Plus de 11 000	A	HF et ER	France entière	Plans d'épandage de boues
Réseau de mesure de la qualité des sols (RMQS, GIS Sol) (c)	2 200	A et F	HF	France entière	Surveillance de sols (mailles de 16 x 16 km)
FOREGS (d)	840	A	ER	Europe	FPGC Européen
GEMAS project (e)	Environ 4 000	A et F	ER	Europe	FPGC Européen (mailles de 160 x 160 km)
LUCAS (f)	23 000	A et F	ER	Europe	FPGC Européen (1 point par 200 km ²)

* : Voir la note de bas de page relative à la « Mesure des ETM dans les sols »

(a) <http://www7.inra.fr/lecourrier/assets/C22Baize.pdf>

(b) <https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/base-de-donnees-elements-traces-metalliques-bdetm-65>

(c) <https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmqs-34>

(d) Lado L. R., Hengl T., Reuter H. I. (2008). Heavy metals in European soils: a geostatistical analysis of the FOREGS Geochemical database. *Geoderma*, 148(2), 189-199.

(e) Birke, M., Reimann, C., Rauch, U., Ladenberger, A., Demetriades, A., Jähne-Klingberg, F., & Team, T. G. P. (2017). GEMAS: Cadmium distribution and its sources in agricultural and grazing land soil of Europe—Original data versus cl-transformed data. *Journal of geochemical exploration*, 173, 13-30.

(f) Tóth, G., Hermann, T., Szatmári, G., & Pásztor, L. (2016). Maps of heavy metals in the soils of the European Union and proposed priority areas for detailed assessment. *Science of The Total Environment*, 565, 1054-1062.

Tableau 15. Statistiques descriptives pour le cadmium des populations de sols échantillonnées dans les bases de données

	Aspitet (a)	BDETM (b)	RMQS France (c)	FOREGS	GEMAS (d)	LUCAS (e)*
Nb échantillons	768	10 634	2 059	840	2 209 (ag) 2 127 (pr)	23 000
Min	< 0,02	0,01	-	< 0,01	< 0,01	0,02
1 ^{er} décile	0,03	0,12	0,06	-	0,07	-
Moyenne	0,42	0,39	0,30	0,284	-	0,09
Médiane	0,16	0,30	0,19	0,145	0,182 (ag) 0,197 (pr)	-
9 ^{ème} décile	1,06	0,69	0,62	0,48	0,431 (ag) 0,564 (ar)	-
Max	6,99	17,1	5,53	14,1	7,5 (ag) 22,5 (pr)	3,17

(a) Baize D., 2000: <http://www7.inra.fr/dpenv/baizec39.htm#stra>

(b) Baize *et al.*, 2006

(c) Saby *et al.*, 2009

(d) Birke *et al.*, 2017

(e) Toth *et al.*, 2017

* La distribution n'est pas présentée dans la publication. Seul l'écart-type sur la moyenne est rapporté (0,11). Cette valeur est très basse par rapport aux autres données, notamment car les échantillons de sol ne sont pas collectés au-delà d'une altitude de 1 000 m, ce qui exclue les zones de montagne avec des roches plus riches en cadmium (exemple : calcaires du Jura).

(ag) : sols cultivés

(pr) : sols de prairies

D'après les bases de données disponibles, les médianes nationales en cadmium des horizons de surface des sols français sont de 0,19 ou 0,3 mg.kg⁻¹ selon la base considérée (France entière). La valeur de la médiane issue de la base ASPITET (0,16 mg.kg⁻¹) est plus proche de celle du RMQS (0,19 mg.kg⁻¹). La valeur médiane issue de la base RMQS (0,19 mg.kg⁻¹) est cohérente avec celle issue de la base européenne GEMAS (0,18 mg.kg⁻¹). La valeur plus élevée (près du double) issue de la BDETM (0,3 mg.kg⁻¹), est très certainement liée au fait que cette base regroupe quasi exclusivement des sols agricoles dans lesquels des apports (exemple : fertilisants minéraux ou organiques) ont été réalisés.

En France, 90% des valeurs mesurées sont inférieures à 0,7 mg Cd.kg⁻¹ (données RMQS ou BDETM). La valeur issue de la base ASPITET est plus élevée, dépassant 1 mg Cd.kg⁻¹. Des valeurs naturelles beaucoup plus importantes (supérieures à 1 mg Cd.kg⁻¹) peuvent cependant être mesurées dans plusieurs sols.

Pour la réalisation de cette étude, la distribution des valeurs de Cd dans les sols uniquement agricoles (cultures et prairies) a été réalisée à partir du réseau RMQS (soit seulement 1 399 sites) avec l'aide de l'unité InfoSol de l'INRA (© INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017) en constatant que :

- Les concentrations faibles ($\text{Cd} < 0,3 \text{ mg.kg}^{-1}$) représentent 67,6% des situations ;
- Les concentrations moyennes ($0,3 \leq \text{Cd} \leq 0,7 \text{ mg.kg}^{-1}$) représentent 25,1% des situations ;
- Les concentrations fortes ($\text{Cd} > 0,7 \text{ mg.kg}^{-1}$) représentent 7,3% des situations.

Ainsi, de façon majoritaire (près de 70%), les sols présentent des concentrations faibles, inférieures à $0,3 \text{ mg Cd.kg}^{-1}$. La distribution spatiale de ces 3 classes est représentée en figure 6. Les situations anomaliques, décrites précédemment (exemple : craies et calcaires, abords du Massif central) se retrouvent très nettement sur cette carte.

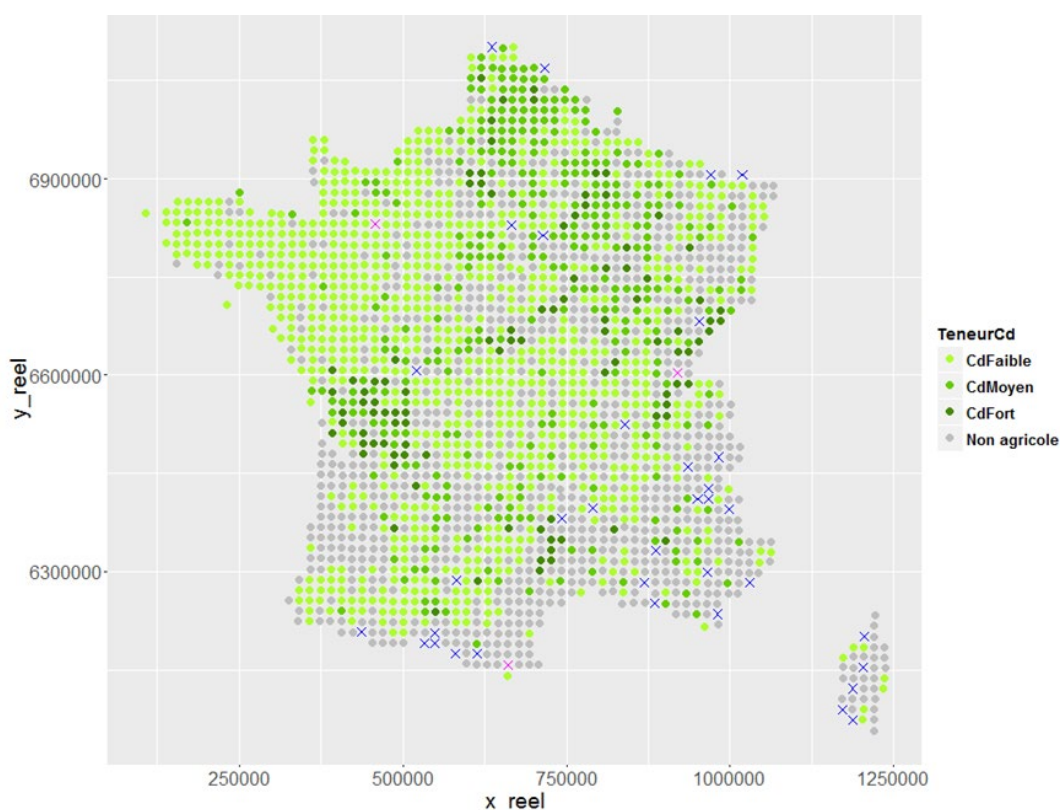


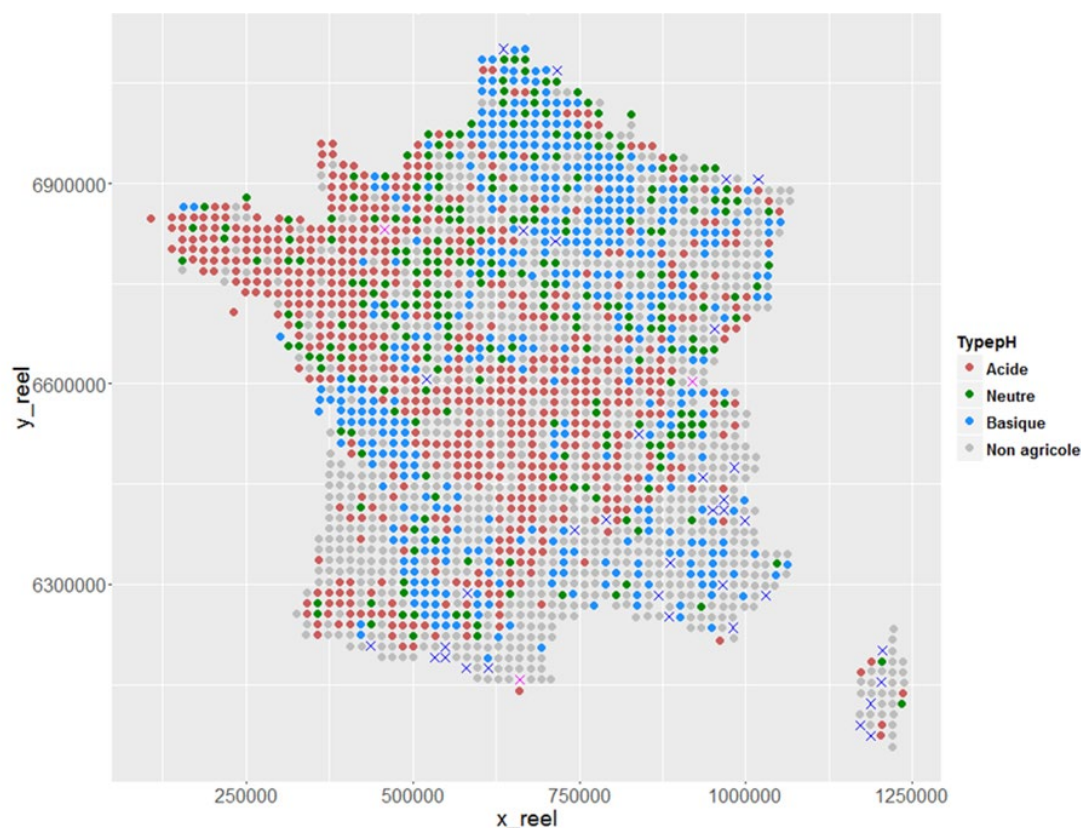
Figure 6. Cartogramme des classes de teneurs en cadmium en considérant les points de prélèvement RMQS agricoles (cultures et prairies) (source : © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017)

2.7.2.2 Le pH des sols : un paramètre clé pour prévoir la disponibilité du phosphore mais également celle du cadmium

Le pH eau du sol est un paramètre déterminant pour prévoir la disponibilité et la mobilité tant du phosphore que du cadmium (vers les plantes, les animaux et les eaux). Afin de simplifier la lecture des tableaux et des cartes, les pH issus des données du RMQS (<https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmq-34>) ont été regroupés dans les 3 catégories suivantes :

- 50% environ des pH des sols sont inférieurs à un pH de 6,5 ;
- 20% des sols présentent un pH compris entre 6,5 et 7,5 ;
- et le reste, soit 30% des sols, sont supérieurs à un pH de 7,5.

Le cartogramme (Figure 7) présente à l'échelle nationale la distribution de ces valeurs.



Légende des classes de pH lié au cartogramme :

Sol acide : pH = [5 ; 6.5[

Sol neutre : pH = [6.5 ; 7.5]

Sol basique : pH =]7.5 ; 8.3]

Figure 7. Cartogramme des types de pH sur les points de prélèvement RMQS agricoles (cultures et prairies) (source : © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017)

2.7.2.3 Apport en cadmium dans les sols par les matières fertilisantes et pratiques agricoles

Le tableau 16 présente pour le blé et la pomme de terre, cultures identifiées à l'origine des aliments les plus contributeurs à l'exposition du consommateur au cadmium dans les études de l'alimentation totale en France (Anses, 2011a, 2016), respectivement des cultures faiblement et très exigeantes en phosphore, des itinéraires types de fertilisation, en fonction de la richesse en phosphore des sols et des apports précédents. Ainsi, sur la base de la grille de calcul des doses de phosphore à apporter établie par le Comifer, sur des sols peu pourvus en phosphore et avec une culture de pommes de terre, les apports recommandés en P_2O_5 sont de $106 \text{ kg } P_2O_5 \cdot \text{ha}^{-1}$ ou bien, s'il n'y a pas eu d'apports depuis 2 ans, d'environ $180 \text{ kg } P_2O_5 \cdot \text{ha}^{-1}$. Pour le blé, culture moins exigeante, l'apport maximal, en cas d'impasse depuis 2 ans, sur un sol peu pourvu en phosphore est de $104 \text{ kg } P_2O_5 \cdot \text{ha}^{-1}$ ou bien en apport annuel de $83 \text{ kg } P_2O_5 \cdot \text{ha}^{-1}$.

Tableau 16. Apports conseillés, en fonction de l'objectif de rendement des cultures, de la nature des sols et du passé de fertilisation

Culture (objectif de rendement)	Réserves du sol	Sol peu pourvu		Sol correctement pourvu		Sol très bien pourvu	
	Passé de fertilisation	Pas d'apport depuis 2 ans	Apport régulier	Pas d'apport depuis 2 ans	Apport régulier	Pas d'apport depuis 2 ans	Apport régulier
Blé (80 q/ha)	Apport (kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹)	104	83	62	0	0	0
Pomme de terre (50t/ha)	Apport (kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹)	178	106	72	48	38	0

Sources : <http://fertilisation-edu.fr/cultures-fiches-pratiques/> et d'après les recommandations d'apport en P & K selon la méthode COMIFER, 2009

Dans leur étude, Belon *et al.* (2012) indiquent que les apports au sol sont majoritairement liés aux engrais phosphatés et aux déjections animales. Il est donc d'intérêt de centrer cette étude sur ces sources d'apports majoritaires.

Les engrais phosphatés utilisés en France sont issus de roches phosphatées riches en cadmium. Actuellement, le projet de révision de la réglementation lié à l'emploi des matières fertilisantes envisage entre autres un abaissement de la teneur en cadmium du fertilisant porteur du marquage CE de 90 mg.kg⁻¹ d'anhydride phosphorique (P₂O₅), à la valeur de 60 mg.kg P₂O₅⁻¹ puis une réduction de ce seuil à 40 mg.kg P₂O₅⁻¹ au bout de 3 ans et à 20 mg.kg P₂O₅⁻¹ après 12 ans.

Un point à considérer dans l'apport de cadmium par la matière fertilisante est la part de cadmium biodisponible. Le cadmium contenu dans ces divers apports peut être sous des formes chimiques différentes et avoir une spéciation différente. Le cadmium peut alors avoir une biodisponibilité différente. Un compte rendu de l'académie des sciences (Juste et Tauzin, 1992) fait un rapport relatif à la biodisponibilité du cadmium contenu dans des boues biologiques cadmiées artificiellement (3 777 mg Cd.kg⁻¹), ou *via* du nitrate de cadmium (Cd(NO₃)₂) ou *via* différents engrais phosphatés avec A : superphosphate triple à 90 mg Cd.kg⁻¹; B : superphosphate triple à 70 mg Cd.kg⁻¹; C : phosphate alumino-calcique 77 mg Cd.kg⁻¹; D : phosphate naturel tendre 21 mg Cd.kg⁻¹. Les intrants ont été apportés pour que les doses de cadmium au sol soient comparables. Du ray-grass d'Italie a été cultivé. Les mesures dans les végétaux montrent la phytodisponibilité suivante :

Cd(NO₃)₂ > boues > A > D > sol sans ajout de phosphate > B > C

Dans cette publication, les auteurs notent que la biodisponibilité du cadmium naturellement présent dans le sol de l'expérimentation est supérieure à celle du cadmium apporté par certains engrais. Dans cette évaluation, il est difficile d'estimer la véritable part de cadmium biodisponible relative à l'apport de matière fertilisante. La spéciation du cadmium dans les intrants agricoles ne peut pas être prise en compte directement, mais indirectement par le biais des caractéristiques du sol (pH, carbonates, etc.), représentant ainsi une limite de l'exercice.

2.7.2.4 Apport en cadmium dans les sols par les dépôts atmosphériques

Le cadmium est émis dans l'atmosphère à partir de sources anthropiques et naturelles. Les sources anthropiques les plus importantes sont la combustion du pétrole et du charbon, l'incinération des déchets municipaux... Smolders et Six (2013) dans leur rapport indiquent que les plus fortes émissions en cadmium sont survenues dans les années 1950 jusqu'au milieu des années 1960.

Les activités industrielles, minières et les envols de sols dispersent également du cadmium dans l'atmosphère. Il retourne au sol par des dépôts secs ou humides. Les dépôts atmosphériques constituent donc une source de contamination des sols agricoles.

Les dépôts atmosphériques en cadmium ont diminué depuis ces dernières décennies (Efsa, 2009 ; Smolders et Six, 2013). En effet, en Europe, les émissions d'éléments métalliques ont montré une tendance décroissante au cours des dernières décennies, en raison de la réduction de la consommation de charbon, l'amélioration des processus de fabrication industrielle et le renforcement de la réglementation environnementale (ICPE en France ; REACH en Europe).

Les dépôts atmosphériques en Europe sont suivis dans le cadre du programme EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme). Cependant, le nombre de stations de contrôle EMEP en France est limité dans les aires rurales (Belon *et al.*, 2012).

En 2012, en France, Belon *et al.* (2012) ont mesuré les apports en cadmium *via* les dépôts atmosphériques. Il est observé dans cette étude que les retombées atmosphériques apportent sur l'ensemble du sol agricole de France 7,5 tonnes de cadmium en moyenne par an (cf tableau 11 en section 2.3)

Dans ce travail de calcul des apports de cadmium au sol agricole des éléments traces métalliques, Belon *et al.* (2012) proposent d'utiliser le réseau de surveillance des retombées atmosphériques par les mousses. Un calcul a été proposé dans cette étude pour estimer les quantités retournant aux sols français.

Le tableau 17 montre les dépôts moyens estimés en France et dans d'autres pays.

Tableau 17. Apports moyens sur les sols agricoles en France et dans d'autres pays (FR : France, GB : Grande-Bretagne, CH : Confédération Helvétique, PB : Pays-Bas, Ch : Chine, A : Allemagne) d'après [Belon *et al.*, 2012]

	FR	GB	CH	PB	Ch	A
Cd (g.ha ⁻¹ .an ⁻¹)	1,8	3,6	1,8	4,5	11,6	4,9

Excepté pour la Confédération Helvétique, les flux moyens français sont plus faibles par rapport aux autres pays européens. L'estimation pour les sols chinois cultivés est la plus élevée en raison de l'agriculture intensive développée depuis plusieurs décennies. Cependant, la comparaison est délicate puisque les divers dépôts présentés dans le tableau 17 ne sont pas obtenus selon le même protocole.

2.7.2.5 Apport en cadmium dans les sols par les eaux d'irrigation

Les eaux superficielles peuvent contenir des quantités variables de cadmium en fonction du fond géochimique et de l'ampleur des activités anthropiques dans les bassins versants. Pour des cours d'eau réputés non pollués, les concentrations en cadmium dissous varient, selon les auteurs, entre 1 et 3 ng.L⁻¹ (Thomas & Meybeck, 1992), de 10 à 350 ng.L⁻¹ (Laane, 1992), alors que dans les matières en suspension, elles se situent dans la gamme 0,3 – 0,8 µg.g⁻¹.

En raison des activités humaines, les eaux d'irrigation sont susceptibles de contenir des quantités non négligeables de cadmium et cela peut donner lieu à des contaminations alimentaires significatives. La maladie Itaï Itaï (association entre des tubulopathies rénales et des atteintes osseuses) observée au Japon est un exemple historique d'intoxications provoquées par la pollution par le cadmium des eaux d'irrigation des cultures (INRS, 2016). En France, une pollution par le cadmium existe dans la rivière Lot : pendant un siècle, l'exploitation de minerai de zinc à Viviez (Aveyron) a entraîné le rejet de centaines de tonnes de cadmium dans la rivière Lot, *via* son affluent, le Riou mort. L'ensemble a engendré une importante pollution du cours d'eau jusqu'à l'estuaire et entraîné la contamination des produits maraîchers arrosés avec l'eau du Lot

(OPECST, 2003).

La directive 2008/105/CE du parlement européen et du conseil du 16 décembre 2008 établit des normes de qualité environnementale des eaux de surface : en ce qui concerne le cadmium, les normes de qualité environnementale en moyenne annuelle (NQE MA) varient entre $\leq 0,08$ et $0,25 \mu\text{g.L}^{-1}$ selon la classe de dureté de l'eau. Les normes de qualité environnementale en concentration maximale admissible (NQE CMA) en cadmium sont comprises entre $\leq 0,45$ et $1,5 \mu\text{g.L}^{-1}$. L'arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique fournit des valeurs repères pour la teneur en cadmium des eaux brutes destinées à la production d'eau potable (valeur guide : $1 \mu\text{g.L}^{-1}$ et limite de qualité : $5 \mu\text{g.L}^{-1}$).

En raison des pressions quantitatives s'exerçant sur la ressource en eau, on tend dans de nombreux pays – notamment dans les contextes arides ou semi-arides – à envisager ou favoriser l'utilisation en irrigation d'effluents issus des stations d'épuration (eaux résiduelles traitées) voire même à irriguer directement les cultures avec des eaux usées non traitées. Outre les risques microbiologiques et les conséquences écologiques (réduction du débit des cours d'eau et altérations des communautés biologiques) inhérents à ces pratiques, il est vraisemblable qu'elles contribueront à augmenter les teneurs en cadmium des sols agricoles. En effet, qu'il s'agisse d'effluents traités ou d'eaux usées brutes, de très nombreuses activités humaines contribuent à libérer du cadmium dans les milieux naturels, cadmium qui, *in fine*, se retrouvera dans les eaux pluviales et les eaux usées.

Chen *et al.* (2013) ont montré que ces pratiques d'irrigation avec des eaux usées traitées peuvent conduire à une forte élévation des teneurs en cadmium dans les horizons superficiels des sols ($0,46 \text{ mg.kg}^{-1}$ dans la couche labourée) et peuvent dépasser deux fois celles des couches profondes. Ces auteurs indiquent également qu'à long terme les risques de pollution des sols par le cadmium sont faibles mais qu'ils peuvent être aggravés par des apports de cadmium issus d'autres sources.

L'irrigation peut également être effectuée directement avec des eaux usées brutes. Ceci a notamment été le cas en France dans les plaines d'Achères et Bessancourt-Pierrelaye qui ont été polluées par des éléments traces métalliques consécutivement à l'épandage des eaux usées brutes de la ville de Paris. Le Comité Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF), puis l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments (Afssa devenue ANSES), ont été consultés à plusieurs reprises depuis 1998 sur la question de la valorisation possible des productions agricoles issus des sols des plaines de Pierrelaye-Bessancourt et d'Achères. Dans son dernier avis en date, l'Afssa (2008) concluait qu'à la lumière des connaissances scientifiques disponibles et des résultats des plans de surveillance des cultures et des récoltes issues des périmètres pollués de Pierrelaye et Achères, la valorisation de ces cultures en alimentation humaine n'était toujours pas envisageable.

Meng *et al.* (2016) rapportent que des sols chinois irrigués pendant trois décennies par des eaux usées présentent des concentrations en cadmium très élevées comparées à celles de sols irrigués par des eaux du réseau potable, qui se traduit aussi par une accumulation importante de cadmium dans les végétaux, notamment au niveau racinaire. Plus récemment, Elgallal *et al.* (2016) ont constaté que l'irrigation par les eaux usées brutes ou partiellement traitées était une pratique qui se répandait dans de nombreuses zones arides et semi-arides. Ceci en raison du fait que l'importance des eaux usées pour l'agriculture est de plus en plus prise en compte non seulement comme une ressource en eau précieuse, mais aussi comme source de nutriments. Considérant qu'une gestion inappropriée de l'irrigation par les eaux usées peut présenter des risques importants pour la santé publique et l'environnement, notamment en matière de risques microbiologiques et de toxicité chimique, ces auteurs ont entrepris de passer en revue et de hiérarchiser les risques liés à ces pratiques d'irrigation. Les risques identifiés concernent les

phénomènes de salinisation, les excès d'azote, de phosphore, de métaux lourds, la présence de polluants organiques persistants et de contaminants émergents, ainsi que l'excès de matière carbonée. Concernant les métaux lourds, les risques et les impacts liés à ces pratiques d'irrigation sont considérés comme élevés pour les sols et la santé humaine, alors qu'ils apparaissent moyens pour la végétation et faibles pour les eaux souterraines et les eaux superficielles.

La littérature consultée montre que les eaux d'irrigation peuvent constituer des sources non négligeables de cadmium dans les sols agricoles, surtout s'il s'agit d'eaux usées partiellement ou non traitées.

2.7.2.6 Transfert du cadmium du sol via la lixiviation

Les apports externes d'éléments traces métalliques aux sols (retombées atmosphériques, matières fertilisantes et supports de cultures, eaux d'irrigation, réincorporation au sol des résidus végétaux issus des cultures...) ne constituent pas des phases indépendantes, mais s'associent aux constituants présents dans les sols et deviennent partie intégrante des phases minérales (argiles, oxyhydroxydes, sulfures, phosphates...), de la matière carbonée ou de la phase aqueuse (Baize et Tercé, 2002).

Le cadmium peut être présent sous forme d'ion libre – il peut alors se déplacer en solution avec le flux de masse – ou sous forme adsorbée sur les argiles et la matière carbonée du sol. Il peut aussi entrer dans la constitution chimique de la phase minérale (oxyhydroxydes, sulfures, phosphates...) et de la matière carbonée du sol. La spéciation du cadmium est fonction de nombreux paramètres physico-chimiques (tels que le pH ou le potentiel d'oxydo-réduction) et biologiques. Le passage du cadmium en solution peut s'effectuer par dissolution de la phase minérale dans laquelle il est inclus ou adsorbé, ou par dégradation de la matière carbonée dans laquelle il est incorporé ou adsorbé.

Les métaux tels que le cadmium peuvent être transférés à partir des sols vers les nappes phréatiques via l'eau gravitaire par simple lixiviation (Denaix *et al.*, 2002). Ces transferts de métaux s'effectuent en solution, mais aussi sous forme colloïdale. En effet, les colloïdes ont des tailles comprises entre quelques nm et quelques μm et des surfaces spécifiques élevées qui facilitent l'adsorption des métaux. Par une approche lysimétrique²⁹, Denaix *et al.* (2001) ont montré dans le cas d'un sol contaminé du Nord - Pas de Calais que le cadmium est essentiellement transféré sous forme soluble et que la proportion de cadmium présent dans la phase colloïdale dépasse rarement 5 %. Dans l'exemple étudié, les concentrations en cadmium dans les eaux lysimétriques n'excèdent pas $0,1 \text{ mg.L}^{-1}$, avec une moyenne égale à $67 \mu\text{g.L}^{-1}$ pour les eaux issues d'un horizon dont la concentration en cadmium était de l'ordre de 15 mg.kg^{-1} .

Cette voie de transfert ne constitue pas la seule possibilité d'exportation d'éléments métalliques à partir d'un sol : les processus érosifs entraînent les éléments métalliques absorbés sur les particules solides (matière carbonée, constituants minéraux). L'amplitude des transferts par érosion est alors fonction de la quantité d'élément absorbée et de l'intensité des processus érosifs. L'érosion pouvant être évitée ou très fortement limitée par des pratiques agricoles appropriées, la lixiviation peut dans ce cas être considérée comme la voie quasi-exclusive d'exportation des éléments métalliques vers les nappes phréatiques et les milieux aquatiques.

²⁹ Un lysimètre est un dispositif permettant de récolter l'eau transitant à travers un sol de telle sorte qu'il soit possible de mesurer la quantité d'eau qui percole et d'analyser sa composition.

Le devenir des métaux dans les sols est étroitement dépendant de la genèse et de la dynamique des différentes phases minérale et organique qui le constituent. Ces processus de pédogenèse et d'évolution des sols sont eux-mêmes étroitement liés aux conditions physico-chimiques régnant dans le sol (pH, température, humidité, composition de la roche mère, potentiel d'oxydo-réduction, etc.), mais dépendent aussi fortement du type d'utilisation et de mise en valeur du sol. En première approche, on peut retenir que :

- Les métaux ne sont pas incorporés durablement dans les argiles mais peuvent être chimi-sorbés sur les oxyhydroxydes ;
- Les métaux peuvent être adsorbés à la surface de la matière organique du sol ;
- Les métaux peuvent être présents comme des constituants intrinsèques de la matière organique, dans laquelle ils peuvent avoir été intégrés lors de leur assimilation par les êtres vivants ;
- Pour les sols à faible teneur en matière organique, les éléments trace métalliques sont surtout présents en solution et leur mobilité est alors élevée ;
- Le pH constitue l'un des principaux paramètres physico-chimiques conditionnant la solubilisation et l'exportation des éléments traces métalliques ;
- D'autres phases minérales (exemple : sulfures) peuvent constituer des compartiments de stockage des métaux car ils forment ensemble des phases insolubles, qui sont donc peu mobiles dans les sols ;
- Lors de changements physico-chimiques (exemple : modification du potentiel rédox ou du pH) ou lors des processus de biodégradation/minéralisation de la matière organique des sols, les éléments traces métalliques peuvent passer en solution et être transférés au sein des différents horizons des sols et vers les eaux souterraines et superficielles.

En résumé, le cadmium peut passer en solution sous forme d'ion libre soit par dissolution de la phase minérale (oxyhydroxydes, phosphates, sulfures) à laquelle il participait, soit par biodégradation de la phase carbonée dans laquelle il était inclus ou sorbé. Les phases insolubles du sol sont plus ou moins stables et les variations des conditions physico-chimiques et biologiques régnant dans le sol peuvent entraîner la libération du cadmium qui passe alors en solution. Le cadmium libre peut être aisément transféré avec l'eau du sol par flux de masse soit vers la végétation et les récoltes (absorption racinaire) soit vers les eaux souterraines et superficielles (flux de masse).

Il n'existe que peu d'informations quantitatives dans la littérature concernant les exportations de cadmium par lixiviation. Sauerbeck (1982) cité par le CSHPF (1998) a évalué les sorties de cadmium par lessivage et percolation à 1 à 2 grammes par hectare et par an, alors que dans le même temps, la part absorbée par les racines était évaluée entre 0,5 et 10 grammes par hectare et par an. Greter-Domerque et Vedy (1989) rapportent également que l'exportation de cadmium par voie gravitaire dans des sols reconstitués avec des boues compostées est négligeable alors que l'exportation par absorption racinaire est par comparaison prépondérante. Dans une autre étude lysimétrique, Keller et Vedy (1991) indiquent que les transferts de cadmium sous forme liquide restent très faibles au regard des stocks disponibles dans les sols étudiés.

L'analyse des informations bibliographiques recueillies indique qu'en l'absence de modifications importantes des conditions physico-chimiques qui règnent dans les sols, les transferts de cadmium sous forme liquide par voie gravitaire sont faibles. Toutefois, les facteurs susceptibles de moduler la redistribution des métaux lourds le long d'un profil de sol agricole sont multiples : espèce et variété cultivée, cinétique de croissance végétale, distribution racinaire, précipitations, pratiques agricoles telles que labour, irrigation, fertilisation, réincorporation de la biomasse après culture, propriétés du sol et notamment, pH, potentiel d'oxydo-réduction, contenu en matière carbonée, contenus en éléments minéraux, oxyhydroxydes, phosphates et sulfures... Les variations de ces facteurs (acidification, oxydo-réduction, modifications des équilibres ioniques...) peuvent conduire à la solubilisation d'une partie du cadmium intégré (ou adsorbé) dans les phases minérales et carbonées du sol et à son transfert vers les eaux superficielles et les cultures.

2.7.2.7 Transfert du cadmium du sol vers la plante : notion de phytodisponibilité

2.7.2.7.1 Principe

Une fraction variable de la quantité totale d'une substance (polluante ou nutritive) présente dans un sol est susceptible de se retrouver dans la solution du sol et être ensuite absorbée par les racines des plantes : elle est qualifiée de fraction phytodisponible. Cette définition théorique est simple à appréhender de façon conceptuelle, mais elle est plus difficile à estimer ou mesurer sur le terrain. En effet, la complexité de l'écosystème sol-plante et les nombreuses interactions et réactions biogéochimiques qui s'y déroulent (et qui sont influencées par des paramètres tels que le pH ou le potentiel redox du milieu) rendent, *in fine*, difficile la mesure et la comparaison des données acquises dans des contextes et avec des protocoles parfois très différents. La phytodisponibilité dépend à la fois de l'offre du sol (estimée le plus souvent par des extractions chimiques telles que celles utilisant CaCl_2) et des besoins de la plante (concentration mesurée après minéralisation acide de l'échantillon). L'activité microbienne du sol est connue pour augmenter la disponibilité du cadmium en solubilisant les minéraux contenant du cadmium *via* l'excrétion d'acides organiques (Ahmad *et al.*, 2015). La modification du sol avec des microorganismes solubilisant le cadmium tels que les Rhizobactéries Favorisant la Croissance des Plantes (RFCP ou PGPR, acronyme de Plant Growth Promoting Rhizobacteria) est une technique très efficace pour améliorer la biodisponibilité du cadmium (Belimov *et al.*, 2005 ; Epelde *et al.*, 2010). Sheng et Xia (2006) ont observé que l'inoculation du sol avec des isolats contenant des bactéries entraîne une augmentation de 74% de la teneur en cadmium dans *Brassica napus*.

2.7.2.7.2 Mobilité du cadmium

Le cadmium peut être transféré relativement fortement vers les plantes (en comparaison avec d'autres ETM), selon sa spéciation chimique, les caractéristiques du sol et du végétal, jouant, *in fine*, sur la bioaccessibilité et la toxicité induite. Les travaux récents de Qi *et al.*, (2018) illustrent l'importance de la solubilité du cadmium au regard de sa biodisponibilité.

La spéciation chimique du cadmium influence en particulier sa solubilité et son encombrement stérique, et donc en conséquence sa mobilité, définie comme l'aptitude à changer de compartiment du sol. En fonction de sa mobilité, le cadmium se distribue entre la phase solide et la solution du sol, compartiment vecteur de mobilité des métaux. C'est en effet au sein de la solution du sol que la plante absorbe les éléments nutritifs et polluants. Mais, cela est conditionné par des facteurs de milieux comme par exemple :

- Le pH : facteur généralement très influant. Un faible pH favorise l'immobilisation des ETM dans la phase solide du sol (plus faible capacité à migrer vers la solution du sol). C'est pourquoi la réglementation relative à l'épandage agricole des boues déconseille cette pratique sur des sols dont le pH est inférieur à 6 ;
- Le potentiel d'oxydoréduction joue sur la mobilité des ETM. Certains éléments comme le fer sont connus comme plus mobiles en condition réductrice (Fe^{II}) et fixes en conditions oxydantes (Fe^{III}) ;
- La Capacité d'Echange Cationique (CEC) : le total de charges négatives du sol pour la fixation réversible de cations métalliques (qualifiés d'échangeables). Plus la CEC est élevée, plus les ETM sont complexés avec la matière organique, les argiles et oxydes du sol, et donc disponibles pour la plante par des transferts qui dépendent en particulier du pH et de l'exigence de la plante ;
- La température et l'humidité : généralement, la mobilité des ETM augmente avec la température et l'humidité (jusqu'à une température et humidité optimales).

De façon plus détaillée, dans le sol, les ETM sont distribués (selon les conditions biogéochimiques) entre la phase solide et la phase liquide (solution du sol) qui le constituent. Le plus souvent, la quantité existant dans la solution du sol ne représente qu'un infime pourcentage de la totalité de l'élément. Les ETM se concentrent donc dans la fraction solide du sol dans laquelle ils se répartissent entre les fractions organique et minérale (Figure 8). Dans la solution du

sol, l'espèce Cd^{2+} prédominerait le plus souvent, accompagnée notamment de CdSO_4 , CdCl^+ et, en sol alcalin, CdHCO_3^+ . Le cadmium peut également former des complexes (minoritaires, mais réactifs) avec la matière organique soluble (Shahid *et al.*, 2017a).

En raison des nombreuses interactions entre les ETM et les constituants du sol, la concentration de cadmium en solution est toujours beaucoup plus faible que celle dans la phase solide. Les processus d'adsorption (possibilité d'avoir un nombre élevé de sites d'adsorption) plus que ceux de précipitation semblent contrôler la distribution du cadmium entre les phases liquide et solide dans les sols. Le pH a un effet important sur l'adsorption du cadmium : divers travaux ont montré que l'adsorption du cadmium augmente considérablement avec l'accroissement du pH du sol. Le métal s'adsorberait généralement sur la matière organique et les oxy-hydroxydes de fer et de manganèse. Les argiles minéralogiques joueraient un rôle relativement faible dans cette adsorption.

Les propriétés physico-chimiques du cadmium font qu'il est relativement plus mobile, et donc plus biodisponible que d'autres ETM. Ainsi, appliquée à une vaste série d'horizons de surface diversement contaminés, la dilution isotopique a montré qu'en moyenne 61 % du cadmium était isotopiquement échangeable, c'est-à-dire susceptible de passer en solution, contre seulement 33% du Zn par exemple.

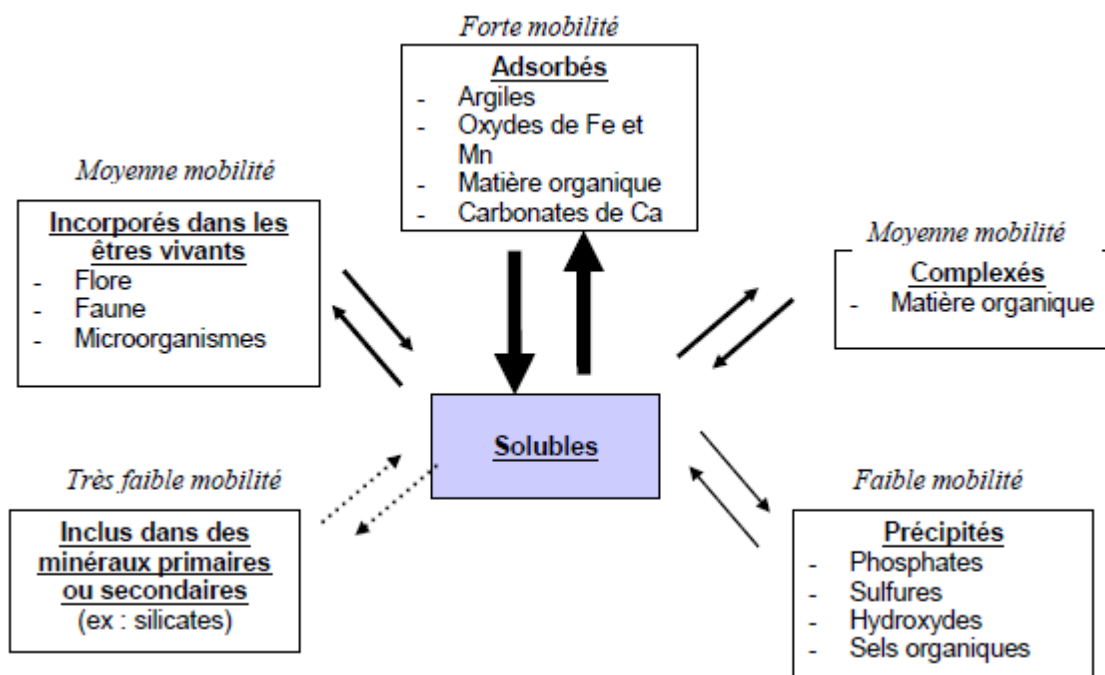


Figure 8. Localisation (spéciation) des éléments en traces métalliques dans le sol (source : ADEME/APCA. (2005)³⁰

Pour estimer les possibles transferts vers les organismes vivants, différentes équations empiriques ont été proposées, tenant compte des valeurs totales et/ou extractibles de cadmium, du pH, des carbonates... Les caractéristiques physico-chimiques des sols sont donc très importantes à considérer lorsque l'on souhaite évaluer les transferts (ces données sont disponibles en France dans les bases de données nationales du RMQS ou de la BDETM).

³⁰ Dérogations relatives à la réglementation sur l'épandage des boues de stations d'épuration. *Comment formuler une demande pour les sols à teneurs naturelles élevées en éléments traces métalliques ?* Guide technique. J. Béraud et A. Bispo. (Coordinateurs). D. Baize, T. Sterckeman, A. Piquet, H. Ciesielski, J. Béraud et A. Bispo (Auteurs). 142 p.)

Différentes méthodes chimiques, basées notamment sur des extractions au moyen de solutions salines (souvent CaCl_2) ou de chélatants (EDTA par exemple) sont utilisées pour estimer la part disponible dans la solution du sol et donc potentiellement absorbable par les plantes. En France, la base de données issue du RMQS propose des statistiques nationales sur les concentrations d'ETM extractibles (à l'EDTA). Pour le cadmium, la médiane des valeurs est de $0,1 \text{ mg. kg}^{-1}$ (90% des valeurs étant inférieures à $0,3 \text{ mg. kg}^{-1}$).

2.7.2.7.3 Phytodisponibilité du cadmium

La mobilité influence la phytodisponibilité. Par conséquent, le transfert du cadmium du sol vers un organe récolté dépend à la fois de paramètres du sol vus précédemment mais aussi de facteurs propres à la plante (Tremel-Schaub A. et Feix I., 2005) :

- L'espèce et la variété végétale. Par exemple, les graminées prélèvent généralement moins d'ETM que les légumes feuilles (laitue, épinard...).
- Les organes végétaux : la règle générale est que, le plus souvent la teneur en ETM est supérieure dans la partie racinaire, elle-même supérieure à la partie foliaire et elle-même supérieure aux parties reproductives (graines et fruits). Il peut cependant y avoir des exceptions, par exemple, les plantes hyperaccumulatrices présentent des concentrations en ETM plus élevées dans leurs parties aériennes.
- Le stade de développement, l'activité biologique et les processus de régulation physiologique (métabolisme) pour une même variété influencent ses besoins et *in fine* l'absorption en éléments inorganiques.

L'accumulation subcellulaire de cadmium dans les plantes varie grandement non seulement parmi les espèces végétales, mais aussi parmi les cultivars et les génotypes des mêmes espèces (Xin *et al.*, 2013). Pour la plupart des plantes, le cadmium tend à s'accumuler dans les racines, avec seulement une petite partie transférée vers des parties aériennes (Ahmad *et al.*, 2011). Certaines espèces de plantes peuvent séquestrer une forte concentration de cadmium dans leurs racines avec une translocation réduite vers les parties aériennes : ces plantes sont appelées plantes à faible accumulation de cadmium (Zhou *et al.*, 2015). L'efficacité des parois de la racine dans le piégeage de cadmium est souvent attribuée à la densité des groupes fonctionnels hydroxyle ou carboxyle qui peuvent former des complexes avec les ETM (Nishizono *et al.*, 1987).

Le mouvement du cadmium des racines aux tissus aériens se produit par le biais du transport de Cd^{2+} libre ou Cd complexé avec divers chélates dans le xylème lié à la transpiration de la plante (Kranner *et al.*, 2011 ; Lux *et al.*, 2011). Les hyperaccumulateurs métalliques peuvent accumuler des niveaux élevés de cadmium dans leurs parties aériennes en raison de l'expression accrue des gènes transporteurs de métaux (Santos *et al.*, 2010).

Comme illustré dans le tableau 18 ci-dessous (Shahid *et al.*, 2017a), les valeurs de cadmium mesurées dans les parties de plantes comestibles varient selon l'espèce (céréales, légumineuses, légumes etc.) et la partie comestible / consommée considérée (grain, racine, tige ou feuille). De plus, l'absorption racinaire, la translocation et la compartimentation des ETM dans la plante cultivée varient considérablement selon les cultivars d'une même espèce (Marmioli *et al.*, 2014). Shi *et al.* (2015) ont, par exemple, montré une variation significative de la concentration de cadmium ($0,14$ à $0,22 \text{ mg.kg}^{-1}$) dans les grains de riz parmi 12 cultivars.

Par ailleurs, la base de données BAPPET (Ademe, INERIS)³¹ regroupe des données de concentrations en métaux dans les plantes potagères issues des publications scientifiques récentes. L'objectif est de regrouper sur un support unique des informations documentaires relatives à la contamination des plantes potagères par les éléments traces métalliques dans différents contextes de pollution. La base a été conçue pour mettre les données à disposition des

³¹ <http://www.ademe.fr/base-donnees-teneurs-elements-traces-metalliques-plantes-potageres-bappet-presentation-notice-dutilisation>

opérateurs en charge des diagnostics environnementaux par le biais de critères discriminants. Dans le cadre des diagnostics environnementaux, la base peut permettre de : (i) situer des résultats de mesure spécifiques au site étudié par rapport à des données de la littérature. Les résultats peuvent ainsi être confortés ou bien au contraire mettre en lumière une situation singulière qu'il conviendra d'approfondir ; (ii) évaluer de manière prédictive des concentrations en substances polluantes dans les plantes à partir des concentrations dans les milieux environnementaux.

Tableau 18. Valeurs de cadmium mesurées dans les parties comestibles des différentes cultures (sources : Shahid *et al.*, 2017a et base de données BAPPET)

Culture	Cd dans les parties comestibles des cultures (mg. kg ⁻¹)
Légumes feuilles	Entre 0,4 (bettes et céleri) et 9 (laitue) Chou chinois : 0,55 Epinard : 1,9 Chicorée endive : 4,5
Légumes fruits	Pois : 0,55 et tomate : 13
Légume racine	Radis : 1,6
Pommes de terre	De 0,01 à 0,25
Céréales	Riz (grain) : 7 Colza : 6 Blé : 0,22
Champignons	de 2,88 à 10
Fèves cacao	3
Herbes aromatiques	Persil : 0,9 Ciboulette : 0,5

Le cadmium est généralement qualifié de très phytodisponible en comparaison avec d'autres éléments inorganiques tels que le plomb (Gill *et al.*, 2012), même si cette phytodisponibilité est nuancée par des facteurs liés aux propriétés du sol (pH, teneur en matières organiques, texture, etc.) et à la physiologie végétale (surface des racines, taux d'exsudation des racines et de transpiration) (Rosén *et al.* 2012). Les interactions très nombreuses entre la plante, le sol et les éléments inorganiques accroissent la variabilité des résultats obtenus lorsqu'on étudie la concentration en cadmium d'une plante.

2.7.2.7.4 Phytotoxicité du cadmium

Le cadmium ne participe à aucun processus vital pour les organismes vivants et divers travaux ont trait à sa phytotoxicité (Toppi *et al.*, 2012, Gallego *et al.* 2012). La phytotoxicité du cadmium est généralement associée à une perturbation de l'absorption et du transport de l'eau et des nutriments, une altération du métabolisme de l'azote, de la photosynthèse, de la croissance et de la respiration des plantes (Lin *et al.*, 2012). Ces effets phytotoxiques du cadmium peuvent perturber l'absorption racinaire et induire de la variabilité supplémentaire dans les résultats mesurés pour diverses conditions de teneurs en cadmium du sol.

L'absorption du cadmium par les végétaux et son accumulation dans les parties comestibles des végétaux reçoivent une attention particulière depuis ces dernières années (Garate *et al.* 1993; Akoumianakis *et al.* 2008; Mombo *et al.* 2016). A cela, il est important de noter que la toxicité humaine induite par le cadmium est observée à des concentrations beaucoup plus faibles que la toxicité végétale. Ainsi, des plantes qui semblent en bon état ne sont pas obligatoirement sans danger pour la consommation humaine.

2.7.2.7.5 Exposition de la plante au cadmium par voie foliaire

Bien que l'absorption racinaire des ETM soit considérée comme la principale voie d'absorption des plantes, l'absorption foliaire a également été identifiée comme une voie potentiellement

significative d'exposition (Schreck *et al.*, 2014, Xiong *et al.*, 2014a, b). En supplément du transfert racinaire de cadmium, il peut également y avoir une contamination en cadmium par voie foliaire des plantes : retombées atmosphériques ou ré-envol de particules de sol pollué qui sont interceptées par les parties aériennes des plantes et interagissent directement avec elles (Shahid *et al.*, 2017b). Harrison et Chirgawi (1989) ont par exemple démontré que la contribution atmosphérique à la contamination des légumes cultivés était de 23 % pour le cadmium. Ce phénomène est particulièrement observé en zones (péri)urbaines et/ou industrielles. Par exemple, à l'échelle globale, les procédés de recyclage et de production des métaux libèrent dans l'atmosphère (et ceci sur de longues distances) des quantités importantes de particules métalliques fines et ultrafines (PM) enrichies en cadmium et autres métaux (Schreck *et al.*, 2014).

2.7.2.7.6 Bilan

Une plante peut donc être contaminée par une fraction variable de cadmium présente dans le sol à la suite de son transfert par l'intermédiaire de la solution du sol et son absorption racinaire. En comparaison avec d'autres ETM, le cadmium est un contaminant très phytodisponible pénétrant facilement dans les végétaux par leurs racines et aussi parfois par leurs parties aériennes. Ce transfert du cadmium dans les végétaux dépendant de multiples facteurs est à l'origine de l'entrée de ce contaminant dans la chaîne alimentaire.

2.7.2.8 Transfert du cadmium du sol vers les animaux

Les connaissances relatives au transfert du cadmium du sol vers les animaux ont été passées en revue par Laurent *et al.* (2005). Alors que le sol peut constituer un réservoir très important de métaux lourds, les transferts directs de ces éléments du sol vers l'animal sont mal connus, car peu étudiés.

Les animaux herbivores sont susceptibles d'ingérer de manière involontaire des quantités significatives de sol adsorbé à la végétation qu'ils consomment. En effet, la végétation prairiale ingérée par les animaux peut être notablement « salie » par des particules de sol adhérant à sa surface. La contamination des surfaces végétales peut s'effectuer par des processus variés : resuspension puis dépôt sous l'effet du vent, projections liées aux précipitations, piétinement par les animaux, pratiques agricoles (épandage, circulation d'engins...). L'ingestion involontaire de sol par les animaux herbivores n'est pas connue avec précision : selon Jurjanz *et al.* (2012), elle pourrait atteindre 10 % de la masse sèche ingérée quotidiennement par la vache en climat tempéré. Lorsque le sol est contaminé par des métaux comme le cadmium, qui est durablement adsorbé ou intégré dans les phases minérale et carbonée du sol, l'ingestion par le bétail de particules de sol adhérentes à la végétation peut donc constituer une voie significative d'exposition des animaux, souvent mal prise en compte.

Une fois ingérés, les éléments traces métalliques peuvent être absorbés par les animaux. Le devenir ultérieur du cadmium dans l'organisme animal est mal connu : les principaux organes cibles sont les reins et le foie, et secondairement les muscles et les os. A l'échelle moléculaire, le cadmium se lie à des métallothionéines. Les éléments traces absorbés par les animaux sont essentiellement éliminés par voie urinaire, alors que les quantités présentes dans les fèces correspondraient aux éléments n'ayant pas été absorbés. L'urine et les fèces (donc les effluents d'élevage) peuvent donc constituer des sources secondaires de contamination des sols.

2.7.2.9 Exposition du consommateur au cadmium

Le consommateur est exposé au cadmium majoritairement par la voie orale hors tabagisme (EFSA, 2009, 2012).

Le cadmium est présent dans une grande partie des aliments consommés. En France, 79% des échantillons alimentaires constitués lors de la deuxième étude alimentation totale (EAT2) (et couvrant presque 90% du régime total des français) ont révélé la présence de cadmium (Anses, 2011a).

En termes de contamination des aliments courants par le cadmium en France, l'EAT2 (Anses, 2011a) montre que les crustacés et mollusques ainsi que les abats sont les aliments présentant les plus fortes teneurs en cadmium (170 et 50 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ en moyenne, respectivement). Ces teneurs importantes dans ces denrées alimentaires d'origine animale s'expliquent par la présence du cadmium dans les sédiments et par sa propension à être bioaccumulé dans certains organes, particulièrement au niveau des reins et du foie. En revanche, les produits à base de lait par exemple, ou encore les viandes, ne sont pas d'importants vecteurs de cadmium.

Pour les denrées d'origine végétale, les teneurs sont moins importantes, mais certaines catégories se distinguent :

- Le chocolat, avec une teneur moyenne importante (30 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ en moyenne) ;
- Les céréales, notamment le blé, que l'on retrouve dans beaucoup de produits comme les biscuits salés, sucrés ou barres céréalières (30 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ en moyenne), le pain et produits de panification sèche (19 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ en moyenne), les viennoiseries (14 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ en moyenne) ou les pâtes (11 $\mu\text{g.kg}^{-1}$ en moyenne) ;
- Les pommes de terre et produits apparentés présentant une teneur moyenne de 21 $\mu\text{g.kg}^{-1}$;
- Les légumes (hors pommes de terre) avec une teneur moyenne de 12 $\mu\text{g.kg}^{-1}$.

Les fruits ne concentrent pas spécifiquement le cadmium et présentent donc des teneurs plus faibles.

Les études européennes (Efsa, 2009, 2012) et nationales (Anses, 2011a et b, 2016) font part de groupes d'aliments similaires identifiés comme contributeurs majeurs à l'exposition du consommateur. Ces aliments contributeurs majeurs à l'exposition du consommateur (résultant du croisement du niveau de contamination et du niveau de consommation) sont :

- Les céréales et produits à base de céréales,
- Les végétaux,
- Et les pommes de terre et produits apparentés.

Concernant la population infantile (0-3 ans), dans l'étude de l'alimentation totale infantile (EATi) (Anses, 2016), les contributeurs majeurs à l'exposition au cadmium pour les plus de 5 mois, pour la plupart ayant commencé à diversifier leur alimentation, sont identiques à ceux identifiés dans la population générale.

Les travaux européens (Efsa, 2012) et nationaux (Anses, 2011a et b) antérieurs à ce sujet ont montré que le risque lié à l'exposition au cadmium par les aliments ne peut donc pas être écarté pour un certain nombre de consommateurs adultes. Il conviendrait ainsi de poursuivre les efforts pour réduire les apports alimentaires de cadmium.

Plus récemment, les conclusions de l'EATi de l'Anses publiée en septembre 2016 (Anses, 2016) font le même constat que, le risque ne peut être écarté pour les enfants de moins de trois ans. Des dépassements de la dose hebdomadaire tolérable (DHT) chez l'enfant sont observés (jusqu'à 29% des enfants de 13 à 36 mois et 36% des enfants de 7 à 12 mois). La DHT considérée dans l'EATi était celle proposée par l'EFSA en 2009 étant établie sur la base d'effets observés après une exposition de l'ordre de 40 à 50 ans, celle-ci ne permettait pas de caractériser spécifiquement le risque chez l'enfant, mais restait néanmoins pertinente quant à la prise en compte des effets chez l'adulte résultant d'une exposition depuis l'enfance. Les dépassements de la DHT identifiés dans l'EATi étaient nettement plus élevés que ceux observés chez les enfants entre 3 et 17 ans (15%) et les adultes (0,6%) dans l'EAT2 (Anses, 2011a). Comme cela a pu être démontré pour les enfants de plus de 3 ans (Anses, 2011b), ces dépassements sont en grande partie liés à la normalisation de l'exposition par le poids corporel des enfants et ne devraient plus être observés dans ces proportions une fois l'âge adulte atteint. Selon l'EATi, ces dépassements doivent

également être relativisés au regard du mécanisme d'action du cadmium chez l'Homme. La DHT de l'Efsa était établie sur la base d'un effet néphrotoxique du cadmium dû à son accumulation au cours du temps au niveau du cortex rénal, les effets se manifestant vers l'âge de 50 ans. Toutefois, les recommandations émises pour réduire l'exposition de la population générale au cadmium sont également pertinentes dans le cas des enfants de moins de 3 ans afin de limiter l'accumulation du cadmium dès le plus jeune âge.

Pour réduire les niveaux d'exposition, les leviers d'action possibles seraient d'agir sur les aliments identifiés comme principaux contributeurs à l'exposition du consommateur au cadmium, en réduisant leurs niveaux de contamination (à la source ou après la production, grâce à un outil réglementaire) et/ou les quantités consommées par des recommandations de consommation. Les travaux de l'Anses en 2011 (Anses, 2011b) ont suggéré une faible efficacité (en termes de réduction des expositions) d'un renforcement de la réglementation actuelle sur les teneurs maximales en cadmium dans les aliments. L'Anses avait donc recommandé d'agir plus en amont, au niveau des sources environnementales et des voies de contamination des aliments, en particulier au niveau des intrants ou matières fertilisantes majoritairement à l'origine de la contamination des sols et des aliments.

Dans cette étude (Anses, 2011b), il est remarqué qu'une action sur les faibles contributeurs à l'exposition du consommateur serait peu efficace. En effet, il serait peu utile de réduire la teneur en cadmium des aliments fortement contaminés en cadmium (exemple : chocolat, abats...) dans la mesure où leur contribution à l'exposition totale serait inférieure à 1% car ce sont des aliments très peu consommés. L'impact d'une réduction de l'exposition liée à la consommation de ces aliments serait en conséquence très faible. De la même façon, la réduction d'impact sera peu visible avec une réduction du cadmium dans des aliments déjà peu contaminés (exemple : les poissons).

Par conséquent, il est nécessaire dans ce travail d'agir sur les aliments identifiés comme contributeurs majeurs à l'exposition du consommateur au cadmium en réduisant leur niveau de contamination depuis la source environnementale.

- ⇒ Dans le but de proposer des niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de limiter la contamination en cadmium des sols agricoles et des productions végétales ainsi que de réduire l'exposition alimentaire associée, la démarche d'évaluation envisagée pourra s'appuyer sur une approche basée sur un bilan de masse (mass balance) entre les entrées et sorties en cadmium du sol agricole, approche analogue à celles employées dans des études récentes (Smolders et Six, 2013 ; KEMI, 2011). Pour cela, les entrées en cadmium dans le sol agricole ne devront pas dépasser les niveaux de sorties en cadmium du sol, afin de limiter l'accumulation du cadmium dans les sols et son transfert. Cette approche sera couplée à une évaluation du risque pour le consommateur à partir des niveaux de contamination en cadmium dans l'alimentation résultant du transfert du cadmium du sol vers l'espèce végétale. Cette démarche devra tenir compte des paramètres impliqués dans le transfert du cadmium le long de la chaîne alimentaire et des spécificités françaises en termes de pratiques agronomiques et de paramètres scientifiques explicités plus haut.

L'enjeu de la démarche est de diminuer la contamination en cadmium des sols et cultures, afin de préserver la santé du consommateur au regard de sa consommation et de la toxicité du cadmium (cf section 2.2) (figure 9).

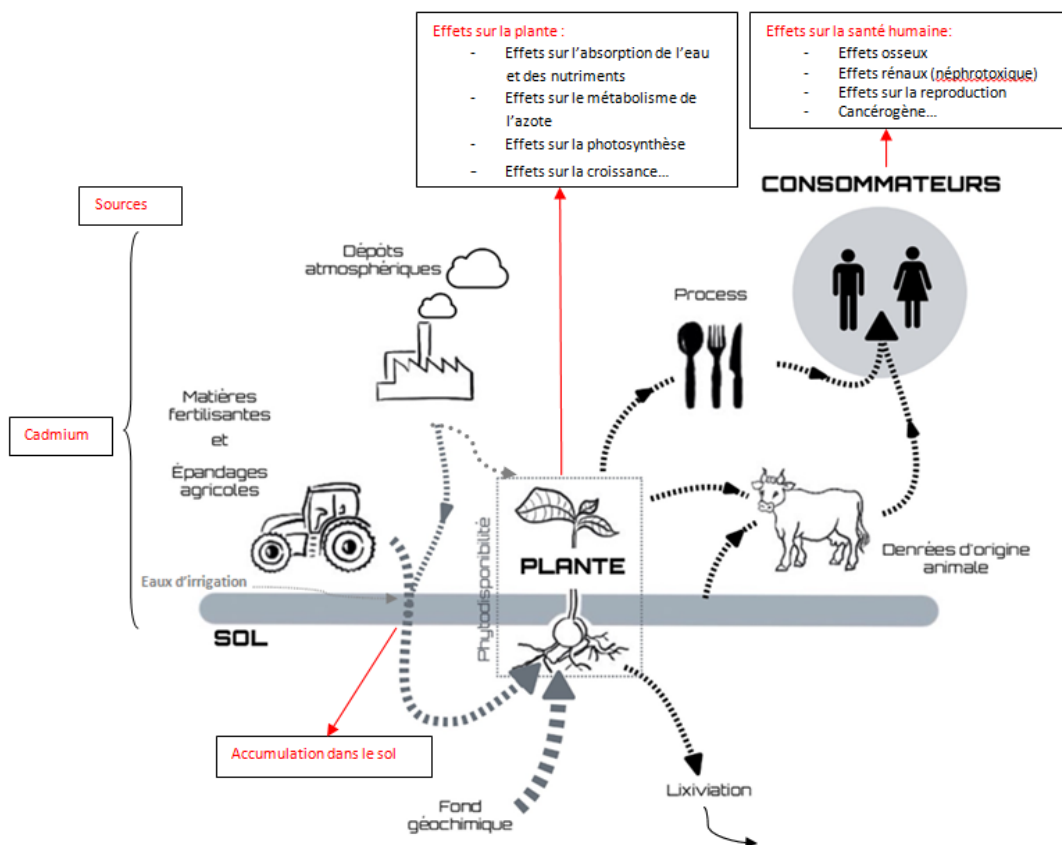


Figure 9. Résumé schématique des sources de cadmium, son absorption par les plantes, ses effets sur la croissance des plantes et la santé humaine

2.8 Construction d'un modèle de transfert du cadmium en vue de l'évaluation de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de réduire la pollution des sols agricoles, la contamination des cultures et l'exposition du consommateur

Les rapporteurs ont jugé nécessaire la construction d'un modèle mathématique, suite à une action à la source, modélisant le transfert du cadmium depuis l'apport de la matière fertilisante dans le sol jusqu'à la plante. Ce modèle tiendra compte de l'ensemble des voies d'entrée (matières fertilisantes, dépôts atmosphériques, eaux d'irrigation) et des voies de sortie du cadmium du sol (culture à vocation alimentaire, lixiviation) le long de ce transfert et des variabilités. Les facteurs influençant la qualité des plantes sont en effet nombreux et en interaction. La comparaison entre les résultats modélisés et les mesures de terrain permettra de valider la pertinence du modèle et éventuellement de l'améliorer. La valeur limite maximale en cadmium dans les matières fertilisantes qui sera proposée découlera des résultats issus de ce modèle (grâce à divers scénarios testés) et du calcul de l'exposition alimentaire associée. La démarche d'évaluation est schématisée dans la figure 10. Le modèle a été construit en considérant les spécificités françaises en termes de pratiques agronomiques, typologie des sols et précipitations.

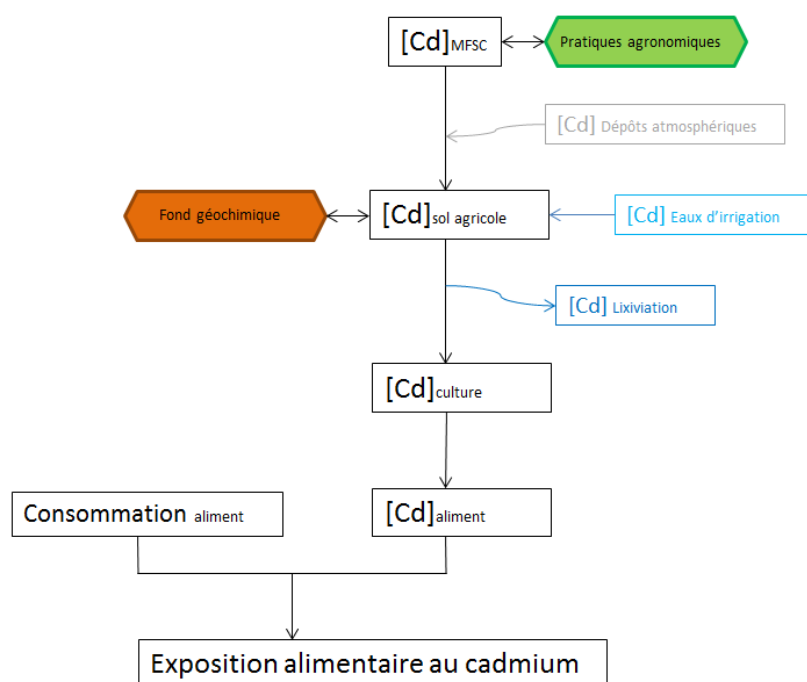


Figure 10. Aperçu schématique de la modélisation du transfert du cadmium depuis l'apport en cadmium dans les sols agricoles par les matières fertilisantes jusqu'au consommateur par l'intermédiaire des productions végétales

2.8.1 Modélisation

La construction de ce modèle s'est appuyée d'une part sur le travail bibliographique décrit en section 2.7 et d'autre part sur la réalisation d'auditions, notamment auprès de l'INRA (INRA, Bordeaux Sciences Agro - UMR Interactions Sol Plante Atmosphère).

La construction de ce modèle a été réalisée en deux temps.

Dans un premier temps, le transfert du cadmium depuis l'apport en cadmium par la matière fertilisante dans les sols agricoles jusqu'à la production végétale a été modélisé. Cette partie du modèle a été construite sur la base d'une approche « mass-balance », tenant compte de l'ensemble des voies d'entrée du cadmium dans le sol agricole (matières fertilisantes, dépôts atmosphériques, eaux d'irrigation) et de voies de sortie du cadmium du sol (culture à vocation alimentaire, lixiviation) le long de ce transfert et des variabilités ainsi que des spécificités françaises explicitées en section 2.7. Cette première phase du modèle permet d'étudier la contamination en cadmium des sols agricoles et la contamination en cadmium des cultures ainsi que le cadmium lixivié en fonction des apports en cadmium par les matières fertilisantes.

Dans un second temps, le transfert du cadmium depuis la production végétale jusqu'au consommateur par les aliments afin d'estimer l'impact sur l'exposition du consommateur a été modélisé. Cette seconde partie du modèle s'est appuyée sur l'exploitation du modèle existant et mis en œuvre par l'Anses dans le cadre de la saisine 2011-SA-0194 relative à la révision des teneurs maximales en cadmium dans les denrées alimentaires (Anses, 2011b). Ce modèle a été actualisé dans ce travail permettant ainsi d'estimer l'exposition alimentaire associée.

La modélisation est schématisée ci-dessous.

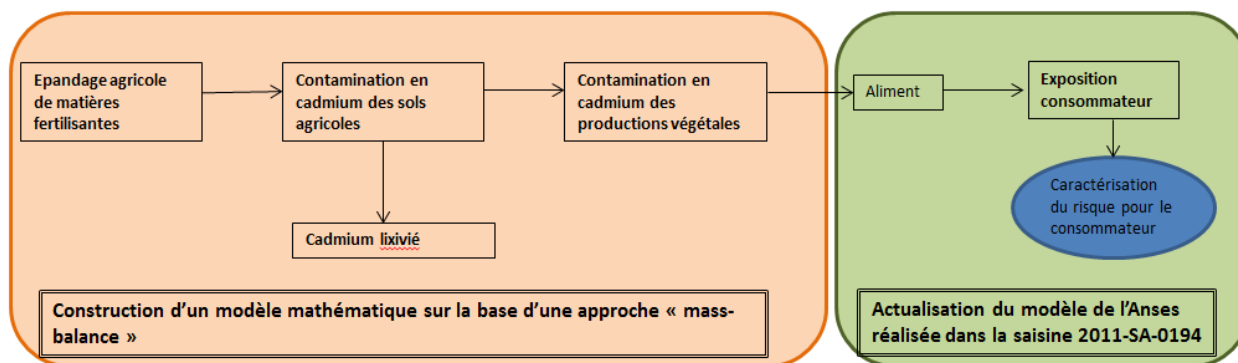


Figure 11. Représentation schématique de la modélisation mise en œuvre dans le but de proposer des valeurs limites en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de maîtriser la pollution en cadmium des sols agricoles, la contamination en cadmium des cultures et l'exposition du consommateur au cadmium

Cette modélisation a été construite en considérant un temps de projection de 99 ans afin de tenir compte du comportement persistant du cadmium.

2.8.2 Modélisation du transfert du cadmium depuis son apport dans les sols agricoles jusqu'à la culture : construction du modèle mathématique sur la base d'une approche bilan de masse (« mass-balance »)

2.8.2.1 Principe

La construction de ce modèle mathématique s'appuie, dans un premier temps, sur la définition d'itinéraires de fertilisation liés à l'usage agricole de matières fertilisantes définissant ensuite les flux entrants en cadmium par les intrants agricoles. Cela constitue la base de la construction du modèle et permet de définir les scénarios représentatifs et protecteurs de la contamination des sols agricoles par les matières fertilisantes. Cela est fonction de la matière fertilisante, des cultures amendées et de la typologie du sol. Le socle de construction de ce modèle implique aussi d'intégrer des paramètres nécessaires à la modélisation du transfert du cadmium depuis la matière fertilisante jusqu'à la culture. Pour limiter les incertitudes, le groupe de travail a considéré que le modèle devra se limiter à la sélection de quelques paramètres. Les paramètres de départ choisis pour la construction du modèle mathématique sont les paramètres susceptibles de jouer un rôle sur la mobilité du cadmium.

Pour établir cette première phase du modèle liée à des itinéraires de fertilisation et des paramètres influant sur le transfert du cadmium, il a d'abord été choisi de faire les calculs des itinéraires de fertilisation sur la base d'un apport avec une matière fertilisante de type engrais minéraux phosphatés, source majoritaire d'apport en cadmium dans les sols agricoles (cf. sections 2.3 et 2.7.2.3). Ce choix résulte aussi du fait de la nécessité de disposer des données maîtrisées pour les engrais phosphatés et de la possibilité de tester différents teneurs en cadmium dans l'engrais phosphaté. La valeur seuil en cadmium calculée dans les engrais minéraux phosphatés sera ensuite transposée selon une comparaison de flux aux autres matières fertilisantes (effluents d'élevage, boues de STEP...) apportant du cadmium dans les sols, sauf les amendements calciques et magnésiens en raison de leur très faible contribution à la contamination du sol en cadmium.

Pour la construction du modèle, des paramètres du sol modulant le transfert du cadmium ont été considérés avec, en premier lieu, le pH, facteur déterminant dans la mobilité du cadmium puis des paramètres comme les teneurs en matière organique, argile et carbone liés au transfert du

cadmium. Le fond géochimique est également un paramètre à prendre en compte dans la modélisation compte-tenu de son importance en tant que stock de cadmium dans le sol.

Puis, la fertilisation de toutes les cultures par les engrais ne pouvant être toutes prises en compte dans la construction du modèle au risque d'introduire des biais supplémentaires, il a été décidé de limiter le modèle à la fertilisation phosphatée de deux cultures identifiées à l'origine des aliments majeurs contributeurs à l'exposition du consommateur au cadmium. Ces cultures, respectivement peu et fortement exigeantes en phosphore, sont le blé et la pomme de terre (Anses, 2011a, 2011b, 2016) (cf. sections 2.2 et 2.7.2.9).

Dans le cadre des itinéraires de fertilisation phosphatée, les pratiques agricoles courantes liées aux cultures de blé et de pomme de terre ont été considérées. Le modèle s'appuie sur un usage agricole en monoculture blé ou en rotation pomme de terre/blé/blé. L'emploi des engrais phosphatés est dépendant des besoins en phosphore de la culture et de l'offre en phosphore du sol en France (pauvre, moyen, riche) (cf. section 2.4). Il a donc été décidé de considérer les itinéraires de fertilisation les plus contributeurs à l'apport en cadmium dans les sols agricoles et liés à des sols pauvrement pourvus en phosphore par rapport aux exigences des plantes. Cette situation représentant une situation maximaliste en nécessitant le plus d'apport en engrais phosphatés représente un tiers des sols en France (cf. section 2.4.2). Les doses d'apport liées aux itinéraires de fertilisation considérées dans le modèle s'appuient sur les préconisations agronomiques et les grilles de coefficient de Arvalis-Institut du Végétal et du Comifer sur la fertilisation phosphatée tel que calculé et présenté en section 2.7.2.3, ainsi que sur les auditions menées dans le cadre de cette saisine. Les itinéraires de fertilisation présentés en section 2.7.2.3 ont ainsi été considérés pour le modèle et sont les suivants :

- monoculture blé :
 - apport annuel de 80 kg P₂O₅.ha⁻¹.an⁻¹ ;
 - et apport de 100 kg P₂O₅.ha⁻¹.an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans.
- rotation pomme de terre/blé/blé :
 - apport annuel de 100 kg P₂O₅.ha⁻¹.an⁻¹ ;
 - et apport de 180 kg P₂O₅.ha⁻¹.an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans.

Une fois les itinéraires de fertilisation définis, le modèle est basé sur un équilibre entre les voies d'entrée et de sortie du cadmium dans le sol agricole en tenant compte des variabilités ainsi que des spécificités françaises. Pour cela, le modèle intègre une approche de type « mass-balance » répondant à la formule suivante :

$$[\text{Cd}]_{\text{sol},i} = [\text{Cd}]_{\text{sol},i-1} + \frac{\text{flux de cadmium entrant dans le sol} - \text{flux de cadmium sortant du sol}}{\text{densité sol}}$$

Avec : [Cd]_{sol,i} = concentration en cadmium dans le sol à l'année i

[Cd]_{sol,i-1} = concentration en cadmium dans le sol à l'année i-1

A l'issue de cette première phase de modélisation, en fonction des apports en cadmium par les engrais minéraux phosphatés utilisés comme source référente des matières fertilisantes et de leurs itinéraires de fertilisation ainsi que du temps de projection, il est possible de déterminer :

- La contamination en cadmium des sols agricoles (horizons de surface) ;
- La contamination en cadmium des cultures (grain de blé, pomme de terre) à la suite de la modélisation du transfert sol-plante, et nécessaire au calcul de l'exposition alimentaire ;
- Le cadmium lixivié à la suite de la modélisation du transfert du cadmium de la phase solide du sol vers la solution du sol.

Il a été choisi de modéliser l'évolution de la concentration en cadmium dans les sols agricoles, dans l'eau lixivié ainsi que les productions végétales suite aux apports en cadmium par les matières fertilisantes sur une période de projection allant jusqu'à 99 ans.

La figure 12 suivante résume l'approche de construction du modèle mathématique.

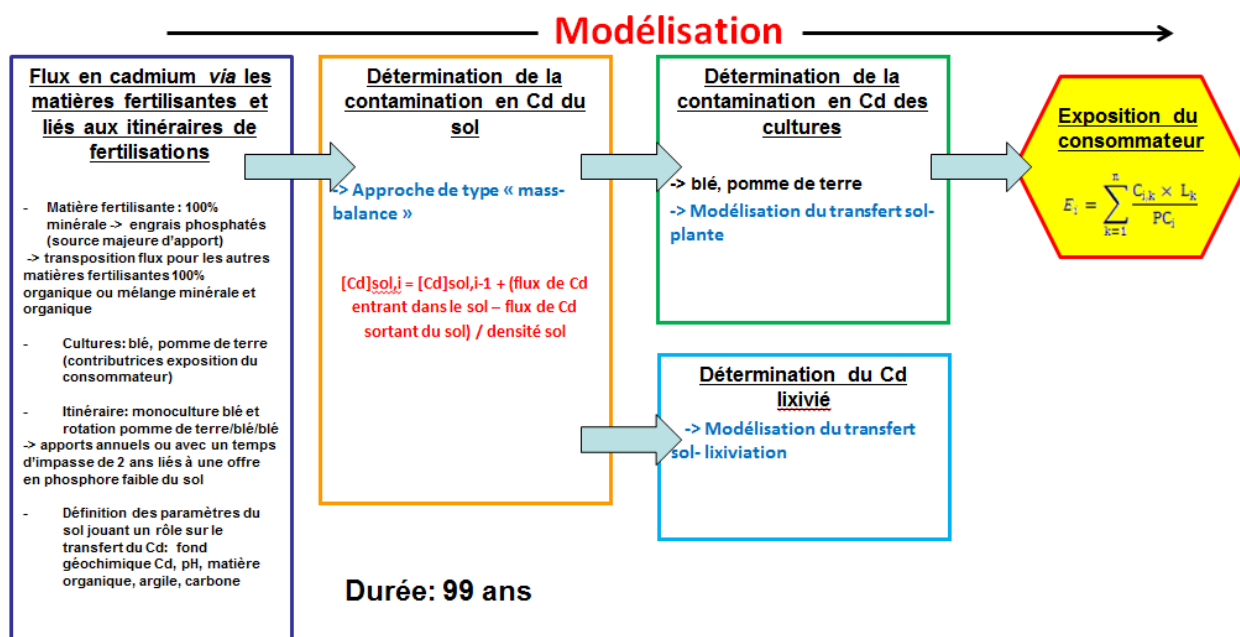


Figure 12. Approche schématique de la modélisation mathématique

Le tableau 19 présente les paramètres d'entrée, les valeurs et équations intégrées dans la construction du modèle probabiliste lié à la phase matière fertilisante-sol-plante du modèle ainsi que l'intégration de la variabilité et le traitement de l'incertitude en fonction des paramètres considérés dans le modèle.

Les données considérées dans l'approche pour le flux entrant en cadmium dans les sols agricoles et le flux sortant en cadmium des sols agricoles ainsi que celles liées aux simulations sont détaillées dans les sections suivantes.

Tableau 19. Paramètres d'entrée intégrés dans la construction du modèle probabiliste lié à la phase matière fertilisante-sol-plante du modèle, valeurs et équations relatives au flux entrant en cadmium et flux sortant en cadmium de l'approche « mass-balance » sur lesquels le modèle s'appuie et inclut l'intégration de la variabilité et le traitement de l'incertitude

Paramètres du modèle	Distribution	Valeurs et équations						Unités	Sources	Variabilité		Incertitude	
		Minimum	Médiane	Moyenne	95 ^{ème} centile	Maximum	Parcelles			Années	Intégrée	Existante	
Paramètres d'entrée liés à l'approche « mass-balance »													
Fond géochimique cadmium	[Cd] _{geo,i}	Empirique	0,010	0,216	0,297	0,849	5,530	mg.kg ⁻¹	RMQS GIS Sol - © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017	x	-	x	x
Densité du sol	W _{sol}	Triangulaire	205	1 310	1 282	1 712	2 251	kg.m ⁻³	RMQS GIS Sol - © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017	x	-	x	x
Flux entrant en cadmium dans le sol agricole													

Paramètres du modèle		Distribution	Valeurs et équations				Unités	Sources	Variabilité		Incertitude		
									Parcelles	Années	Intégrée	Existante	
Concentration cadmium dans la matière fertilisante (sur la base des engrais phosphatés comme source référente)	[Cd] _{type MF}	Ponctuelle	Seuils fixes durant la simulation sur 99 ans	Année 1 à 99				mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹	Seuil réglementaire actuel et seuils proposés pour les engrais phosphatés dans le projet de révision de réglementation de la Commission européenne	-	Uniquement scénario avec des teneurs en Cd dégressives sur la période de projection de 99 ans	-	-
				90	60	40	20						
			Seuils dégressifs durant la simulation sur 99 ans	Année 1 à 3	Année 4 à 15	Année 16 à 99							
			60	40	20								
Dose d'apport de la matière fertilisante (sur la base des engrais phosphatés comme source référente)	dose phosphoresol,culture,année	Ponctuelle	<u>Monoculture blé :</u> - Apport annuel : 80 - Apport annuel avec un temps d'impasse de 2 ans: 100/0/0 <u>Rotation pomme de terre/blé/blé :</u> - Apport annuel : 100 - Apport annuel avec un temps d'impasse de 2 ans: 180/0/0				kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹	Arvalis, Comifer	-	Selon les scénarios	-	-	
Apport en Cd dans les sols agricoles via les matières fertilisantes (sur la base des engrais phosphatés comme source référente)	[Cd] _{fertilisant}		[Cd] _{fertilisant} = [Cd] _{type MF} X dose _{phosphoresol,culture,année}				mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹						

Paramètres du modèle		Distribution	Valeurs et équations					Unités	Sources	Variabilité		Incertitude		
										Parcelles	Années	Intégrée	Existante	
Concentration cadmium <i>via</i> les dépôts atmosphériques	[Cd] _{atm}	Empirique	Minimum	Médiane	Moyenne	90 ^{ème} centile	Maximum	µg/m ²	Belon <i>et al.</i> , 2012	X	X	X	x	
			9,2	23,8	26,4	41,6	76,2							
Concentration cadmium <i>via</i> les eaux d'irrigation	[Cd] _{eau, irrig}	LogNormale Tronquée	Minimum	Médiane	Moyenne	90 ^{ème} centile	Maximum	µg.L ⁻¹	FOREGS database	x	-	x	x	
			1.10 ⁻⁶	0,01	0,03	0,08	1,24							
Quantité d'eau d'irrigation blé	Q _{irrig,blé}	Triangulaire	Minimum	Médiane	Moyenne	90 ^{ème} centile	Maximum	L.ha ⁻¹	Arvalis, Comifer	x	x	x	x	
			200 100	573 174	629 653	1 079 806	1 484 662							
Quantité d'eau d'irrigation pomme de terre	Q _{irrig,pdt}	Triangulaire	Minimum	Médiane	Moyenne	90 ^{ème} centile	Maximum	L.ha ⁻¹	Arvalis, Comifer	x	x	x	x	
			1 005 000	1 500 000	1 560 000	2 060 000	2 488 000							
Transfert du cadmium dans les sols agricoles <i>via</i> les eaux d'irrigations	[Cd] _{transfert eau irrig}		[Cd] _{transfert eau irrig} = [Cd] _{eau irrig} - X Q _{irrig blé, pdt}					mg.ha ⁻¹						
Flux sortant en cadmium du sol agricole														

Paramètres du modèle		Distribution	Valeurs et équations					Unités	Sources	Variabilité		Incertitude	
										Parcelles	Années	Intégrée	Existante
Carbone	Carbone	Empirique	Minimum	Médiane	Moyenne	95 ^{ème} centile	Maximum	g.kg ⁻¹	RMQS GIS Sol - © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017	x	-	x	x
			2,6	17,5	21,6	48	145						
pH sol	pH	Empirique	Minimum	Médiane	Moyenne	95 ^{ème} centile	Maximum	-	RMQS GIS Sol - © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017	x	-	x	x
			4,5	6,53	6,70	8,20	8,70						
Concentration cadmium dans la solution du sol	[Cd] _{ss}		$[Cd]_{ss} = [Cd]_{sol}/KD$ Avec : $\log_{10} KD = 1,547 + 0,671 \cdot \log_{10}(\text{Carbone}) + 0,362 \cdot \text{pH} - 0,943 \cdot \log_{10}(\text{DOC})$					µg Cd.L ⁻¹	De Vries <i>et al.</i> , 2011 ; De Vries <i>et al.</i> , 2013				
Précipitations annuelles	Q _{pa}	Empirique	Minimum	Médiane	Moyenne	95 ^{ème} centile	Maximum	L.ha ⁻¹	FOCUS 2005-2015 (Anses-DEPR)	x	x	x	x
			202	746,2	776,5	1205,8	2256						
Transfert du cadmium <i>via</i> la lixiviation	[Cd] _{lix}		$[Cd]_{lix} = [Cd]_{ss} \times 0,3 \times (Q_{pa} + Q_{irrig\ blé, pdt})$					µg.ha ⁻¹					
Matière organique	MO	Empirique	Minimum	Médiane	Moyenne	95 ^{ème} centile	Maximum	g.kg ⁻¹	RMQS GIS Sol - © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017	x	-	x	x
			0,447	3,73	3,03	8,30	25,10						

Paramètres du modèle		Distribution	Valeurs et équations					Unités	Sources	Variabilité		Incertitude	
										Parcelles	Années	Intégrée	Existante
pH sol	pH	Empirique	Minimum	Médiane	Moyenne	95 ^{ème} centile	Maximum	-	RMQS GIS Sol - © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017	x	-	x	x
			4,5	6,53	6,70	8,20	8,70						
Argile	Argile	Empirique	Minimum	Médiane	Moyenne	95 ^{ème} centile	Maximum	g.kg ⁻¹	RMQS GIS Sol - © INRA, Unité INFOSOL, Orléans, 2017	x	-	x	x
			31	217	247,3	497	798						
Transfert du cadmium dans les cultures	[Cd] _{cult}		<u>Blé (grain)</u> : $\log [Cd]_{cult} = 0.703 + 1.04 \log [Cd_{soil}] - 0.175pH$ <u>Pomme de terre</u> : $\log [Cd]_{cult} = 0,97 - 0,41 \times \log [MO] - 0,20 \times \log [argile] + 0,81 \times \log [Cd_{soil}] - 0,21 \times pH$					mg.kg ⁻¹	Ran <i>et al.</i> , 2016 Franz <i>et al.</i> , 2008				
Rendement blé	R _{blé}	Triangulaire	Minimum	Médiane	Moyenne	Maximum	Kg.ha ⁻¹	Arvalis, Comifer	x	x	x	x	
			2 800	7 000	6 700	10 200							
Rendement pomme de terre	R _{pdt}	Triangulaire	Minimum	Médiane	Moyenne	Maximum	Kg.ha ⁻¹	Arvalis, Comifer	x	x	x	x	
			45 000	47 500	47 500	50 000							

2.8.2.2 Flux entrant en cadmium dans le sol agricole

Comme indiqué dans le tableau 19, le flux entrant du Cd dans le sol considéré dans le modèle est lié à l'apport par :

- les matières fertilisantes,
- le dépôt atmosphérique,
- et les eaux d'irrigation.

Cela s'ajoute au « fond géochimique » en Cd ($[Cd]_{geo,i}$), qui représente le cadmium présent dans le sol en début de simulation (les teneurs actuelles des sols agricoles sont dues aux teneurs naturelles et également aux apports anthropiques). Les bases de données du RMQS (GIS Sol), fournies par l'unité INRA InfoSol ont permis de disposer de la distribution des concentrations du cadmium liée au fond géochimique dans les sols agricoles français dont le modèle tient compte.

Les données d'entrées du flux entrant en cadmium sélectionnées dans le modèle selon le type d'apport sont décrites ci-après.

L'apport en cadmium par les matières fertilisantes (sur la base de l'engrais minéral phosphaté) est calculé selon la formule suivante :

$$[Cd]_{\text{fertilisant}} = [Cd]_{\text{type MF}} \times \text{dose}_{\text{phosphoresol,culture,année}}$$

avec : $[Cd]_{\text{fertilisant}}$: apport en cadmium par la matière fertilisante, exprimé en mg Cd.kg P₂O₅⁻¹

$[Cd]_{\text{type MF}}$: concentration en cadmium dans la matière fertilisante, exprimée en mg.kg⁻¹

$\text{dose}_{\text{phosphoresol,culture,année}}$: dose d'apport de la matière fertilisante calculée en fonction de la teneur en phosphore du sol, des exigences en phosphore de la plante et de l'année, exprimée en kg P₂O₅.ha⁻¹.an⁻¹.

La détermination de la dose d'apport de la matière fertilisante s'est appuyée sur les préconisations agronomiques et les grilles de coefficient de Arvalis-Institut du Végétal et du Comifer sur la fertilisation phosphatée ainsi que sur les auditions menées dans le cadre de cette saisine (INRA) comme expliqué précédemment dans la section 2.8.2.1. Il est rappelé que les doses d'apport ont été calculées sur la base de l'emploi d'engrais phosphatés pour des itinéraires de fertilisation liés à des monocultures blé ou rotation pomme de terre/blé/blé en présence de sols pauvrement pourvus en phosphore et sont présentées dans la section précédente 2.8.2.1 et le tableau 19.

Celles-ci sont ensuite croisées avec la concentration en cadmium dans la matière fertilisante afin d'obtenir le flux entrant en cadmium dans les sols agricoles par l'engrais phosphaté telle qu'indiquée dans la formule ci-dessus.

Pour la concentration en cadmium dans la matière fertilisante entrée dans le modèle, il est considéré comme hypothèse de départ d'utiliser le seuil réglementaire actuel normé dans les engrais phosphatés de 90 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ ainsi que les seuils réduits proposés dans le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE de la Commission européenne pour les engrais phosphatés de 60, 40 et 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹. Ces seuils sont considérés fixes ou dégressifs (en concordance avec une proposition du projet de révision de la réglementation) le long de la modélisation comme résumé dans le tableau ci-dessous.

Tableau 20: Hypothèses de seuils de concentrations en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés testés dans le modèle probabiliste

Concentration en cadmium dans l'engrais minéral phosphaté	Seuils fixes au cours de la modélisation (mg Cd. kg P ₂ O ₅ ⁻¹)	Durée de projection : 1 à 99 ans			
		90	60	40	20
	Seuils régressifs au cours de la modélisation (mg Cd. kg P ₂ O ₅ ⁻¹)	Année 1 à 3	Année 4 à 15	Année 16 à 99	
		60	40	20	

Ainsi, le modèle est adapté en fonction des seuils en cadmium constants ou dégressifs dans l'engrais minéral phosphaté apporté au sol agricole durant le temps de projection.

En couplant les deux doses d'apport, apport annuel et avec un temps d'impasse, par deux itinéraires de fertilisation, monoculture blé et rotation pomme de terre/blé/blé, ainsi qu'avec les quatre seuils en cadmium choisis comme hypothèse de départ constants dans la matière fertilisante (sur la base de l'emploi des engrais minéraux phosphatés) sur une projection de 99 ans, et en complétant par l'application des seuils en cadmium dégressifs selon le projet de révision de la réglementation européenne des MFSC aux deux doses d'apport par itinéraire de fertilisation en monoculture blé ou en rotation pomme de terre/blé/blé : cela représente vingt scénarios d'itinéraires de fertilisation liés aux flux entrants à appliquer au modèle identifiés en annexe 2.

Il est noté qu'à l'issue de la modélisation, les scénarios d'itinéraire de fertilisation avec les apports en cadmium associés liés à l'usage des engrais minéraux phosphatés dans le modèle seront ensuite transposés pour les autres matières fertilisantes (100% organiques et mixtes) selon un calcul et comparaison de flux afin de dériver les niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes.

Concernant l'apport en cadmium par le dépôt atmosphérique : il a été considéré la distribution de l'apport en cadmium des retombées atmosphériques sur les sols agricoles français estimée selon l'étude de Belon *et al.*, 2012.

L'apport en cadmium par l'eau d'irrigation est calculé sur la base d'une teneur dans les eaux de surface et d'un volume d'irrigation propre à chaque culture selon la formule suivante :

$$[\text{Cd}]_{\text{transfert eau irrig}} = [\text{Cd}]_{\text{eau irrig}} \times Q_{\text{irrig blé, pdt}}$$

avec $[\text{Cd}]_{\text{transfert eau irrig}}$: concentration en cadmium transférée dans les sols agricoles *via* les eaux d'irrigations, exprimée en mg.ha⁻¹

$[\text{Cd}]_{\text{eau irrig}}$: concentration en cadmium dans les eaux d'irrigation, exprimée en µg.L⁻¹

$Q_{\text{irrig blé, pdt}}$: quantité d'eau d'irrigation selon la culture blé ou pomme de terre, exprimée en L.ha⁻¹

La détermination des teneurs en cadmium dans les eaux d'irrigation provient de l'exploitation de la base de données FOREGS³². Quant à l'estimation de la quantité d'eau d'irrigation pour la culture, cela s'appuie sur les données d'Arvalis.

³² <http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/> et http://sigminesfrance.brgm.fr/geoch_foregs.asp

2.8.2.3 Flux sortant en cadmium du sol agricole

Le flux sortant du sol considéré dans le modèle s'appuyant sur une approche « mass-balance » comporte :

- la lixiviation
- et le transfert du sol vers les plantes cultivées (détaillé dans la section 2.7.2.7).

Concernant la lixiviation, la quantité de cadmium lixivié chaque année est calculée en déterminant la concentration de cadmium dans la solution du sol en utilisant la formule ci-dessous proposée par Devries *et al.* (2011 ; 2013), puis en déterminant le volume de cette solution qui quitte chaque année l'horizon du sol considéré (20 cm). Ce volume est estimé selon un pourcentage du volume d'eau reçu par la parcelle chaque année, considérant une proportion de 30% d'eau liée à l'eau irriguée et le restant (70%) à l'eau issue des précipitations. Les précipitations sont estimées, en utilisant pour la France sur la période 2005-2015, les valeurs de la base FOCUS 2005-2015 (Anses-DEPR).

Cela est résumé dans les formules présentées au préalable dans le tableau 19 et qui sont les suivantes :

$$[\text{Cd}]_{\text{lix}} = [\text{Cd}]_{\text{ss}} \times 0.3 \times (\text{Qpa} + \text{Q}_{\text{irrig blé, pdt}})$$

Avec : $[\text{Cd}]_{\text{lix}}$: concentration en cadmium lixivié, exprimée en $\text{mg} \cdot \text{hectar}^{-1}$

$[\text{Cd}]_{\text{ss}}$: concentration en cadmium dans la solution du sol, exprimée en $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Qpa : précipitations annuelles, exprimée en $\text{L} \cdot \text{ha}^{-1}$

$\text{Q}_{\text{irrig blé, pdt}}$: quantité d'eau d'irrigation selon la culture blé ou pomme de terre, exprimée en $\text{L} \cdot \text{ha}^{-1}$

Et $[\text{Cd}]_{\text{ss}} = [\text{Cd}]_{\text{sol}} / \text{KD}$ (équation de la publication de De Vries (2011, 2013))

Avec : $[\text{Cd}]_{\text{ss}}$: concentration en cadmium dans la solution du sol, exprimée en $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

$[\text{Cd}]_{\text{sol}}$: concentration en cadmium dans le sol, exprimée en $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

KD : coefficient de distribution entre la solution du sol et la phase solide du sol, calculé selon l'équation suivante: $\log_{10} \text{KD} = 1,547 + 0,671 \cdot \log_{10} (\text{Carbone}) + 0,362 \cdot \text{pH} - 0,943 \cdot \log_{10} (\text{DOC})$

Avec $\text{DOC} = 50$

Concernant le transfert du cadmium du sol vers les plantes cultivées, le choix des modèles de transfert du cadmium du sol vers les plantes (blé dur, blé tendre et pomme de terre) a été fait sur la base de la littérature scientifique. Les équations ont été retenues sur la base des critères suivants : la contamination du sol en cadmium n'était pas issue d'activités industrielles et les paramètres de l'équation peuvent être renseignés par les données du RMQS (GIS Sol). La littérature montre que peu de relations sont directement utilisables car elles utilisent des données de transferts de cadmium issus de sols contaminés par des activités industrielles ou des paramètres non renseignés dans la base de données du RMQS (exemple : extraction en Diffusive gradient in thin-film (DGT) ou autres extraction partielle, concentration du cadmium dans le liquide du sol) ou encore des végétaux autres que ceux retenus dans le cadre de la présente expertise.

Ainsi, les deux équations retenues et référencées dans le tableau 19 sont :

- Pour le blé (sans distinction de variété tendre ou dur) :

$$\log_{10} [\text{concentration Cd dans le grain de blé}] = 0.703 + 1.04 \log_{10} [\text{Cd}_{\text{sol}}] - 0.175\text{pH} \text{ (Ran et al., 2016)}$$

- Pour la pomme de terre :

$$\log_{10} [\text{concentration Cd dans la pomme de terre}] = 0,97 - 0,41 \times \log_{10} [\text{MO}] - 0,20 \times \log_{10} [\text{argile}] + 0,81 \times \log_{10} [\text{Cd}_{\text{sol}}] - 0,21 \times \text{pH} \text{ (Franz et al., 2008)}$$

En raison de la difficulté d'estimer la part réelle de cadmium biodisponible relative à l'apport de matière fertilisante, la modélisation du transfert du cadmium depuis son apport dans les sols agricoles jusqu'à la culture a considéré le cadmium total entièrement biodisponible représentant une situation protectrice d'un point de vue sanitaire. La spéciation du cadmium dans les intrants agricoles n'a certes pas pu être prise en compte directement, mais l'a été indirectement par le biais des caractéristiques du sol (pH, carbonates, etc.) par les équations de transfert.

2.8.2.4 Simulation des concentrations au cours du temps

Les concentrations modélisées en cadmium dans le sol, le blé, la pomme de terre et les eaux lixiviées sont créées sur 99 ans à l'aide de simulations Monte-Carlo. Pour un itinéraire donné, 10 000 parcelles sont simulées. Les simulations tiennent compte de la diversité des parcelles présentes en France, en particulier en utilisant les données du RMQS-GIS SOL, sur la base des parcelles agricoles (cultures et prairies) parmi les 2 059 sols échantillonnés sur le territoire français par le RMQS-GIS SOL. De plus, chaque parcelle est définie par un vecteur contenant la concentration en cadmium liée au fond géochimique, les concentrations en matière organique, en argile et en carbone ainsi que le pH du sol. Les corrélations observées entre ces paramètres dans les parcelles françaises sont prises en compte. Les variations des concentrations en cadmium sont ensuite calculées en fonction de la durée de la modélisation (exemple : 10, 20, 60 et 99 ans) pour les 10 000 parcelles. Certains paramètres, comme la quantité d'eau de pluie, les rendements agricoles ou la quantité d'eau d'irrigation varient d'une parcelle à l'autre et d'une année à l'autre. La variabilité des paramètres a été considérée en tirant aléatoirement une valeur différente par parcelle et par année directement dans les distributions ajustées aux données. A partir de l'approche « mass-balance » et des équations de transfert et de lixiviation, les concentrations en cadmium sont ensuite simulées sur 99 ans pour les 10 000 parcelles.

L'algorithme a été programmé sous le logiciel R (version 3.4.0, 21-04-2017) et une application a été développée sous R-shiny permettant à l'utilisateur de sélectionner l'itinéraire qu'il souhaite simuler. R-Shiny permet de faire l'interface entre la programmation et la présentation sous forme de pages web interactives sur lesquelles il est possible de réaliser toutes les analyses / actions relatives au modèle. Les moyennes et centiles des concentrations en cadmium dans le sol, la plante (blé, pomme de terre) et lixiviées sur l'ensemble des parcelles sont ensuite présentés dans des tables et graphiques. Une analyse en fonction du type de sol (concentration du fond géochimique, matière organique, argile, carbone et pH) ainsi que des paramètres d'entrée (quantité eau de pluie, concentration en cadmium des eaux d'irrigation etc) est fournie. Une analyse de sensibilité au nombre de parcelles simulées a été réalisée et montre que la simulation de 10 000 parcelles est suffisante pour obtenir des résultats stables.

2.8.3 Modélisation de l'exposition du consommateur : actualisation du modèle de l'Anses (saisine 2011-SA-0194)

2.8.3.1 Principe

La seconde étape de la modélisation a consisté à évaluer l'exposition du consommateur, à partir des données de consommation individuelle et des données de contamination.

Pour interpréter les niveaux d'exposition alimentaire, ces derniers sont comparés à la valeur toxicologique de référence par ingestion définie pour le cadmium.

Dans le contexte de la question 3 de la saisine, le but est :

- D'évaluer l'impact de la VTR chronique au cadmium par voie orale révisée dans cette saisine ($0,35 \mu\text{g Cd.kg pc}^{-1}.\text{j}^{-1}$) sur l'exposition du consommateur,
- Et d'estimer l'impact d'une action sur les sources environnementales (en l'occurrence une réduction des teneurs en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés) sur l'exposition chronique (moyenne, 95^{ème} centile et pourcentage de dépassement de la VTR) des consommateurs (adultes et enfants), pour certains scénarios issus de la première phase du modèle modifiant la contamination des aliments à base de blé et de la pomme de terre.

2.8.3.2 Données et calcul de l'exposition

Les données de consommation alimentaire utilisées proviennent de l'étude INCA2³³. Les hommes et femmes adultes correspondent aux individus de 18 à 79 ans. A noter que les individus sous-déclarants n'ont pas été retenus pour le travail. En tout, 1 918 individus adultes et 1 444 enfants de 3 à 17 ans ont été considérés. Ces effectifs sont suffisants pour calculer le 95^{ème} centile d'exposition³⁴.

Les données de contamination des aliments par le cadmium proviennent de la seconde étude de l'alimentation totale française (EAT2)³⁵. Les données censurées (inférieures aux limites analytiques) ont été traitées dans un premier temps selon 3 hypothèses adaptées des recommandations de l'OMS³⁶ : lowerbound (LB), middlebound (MB) et upperbound (UB).

Dans le scénario LB, les résultats de type « non détecté » sont remplacés par zéro, les résultats de type « non quantifié » sont remplacés par la valeur de la limite de détection (LOD). Dans le scénario MB, les résultats de type « non détecté » sont remplacés par 1/2 de la LOD, les résultats de type « non quantifié » sont remplacés par 1/2 de la somme de la limite de quantification (LOQ) et de la limite de détection (soit $(\text{LOQ}+\text{LOD})/2$). Dans le scénario UB, les résultats de type « non détecté » sont remplacés par la LOD, les résultats de type « non quantifié » sont remplacés par la LOQ.

L'exposition alimentaire chronique a été calculée de façon individuelle pour l'ensemble des sujets de l'étude INCA2 selon la formule suivante :

³³ AFSSA (2009). Etude Individuelle Nationale des Consommations Alimentaires 2 (INCA2) (2006-2007)

³⁴ EFSA (2008). Guidance Document for the use of the Concise European Food Consumption Database in Exposure Assessment.

³⁵ ANSES (2011a). Etude de l'Alimentation Totale Française (EAT2) Tome 1 - Contaminants inorganiques, minéraux, polluants organiques persistants, mycotoxines, phyto-estrogènes, ANSES : 305.

³⁶ WHO (2013). Reliable evaluation of low-level contamination of food. Addendum of the report on GEMS/Food-EURO second workshop of the 26-27th May 1995.

$$E_{i,j} = \frac{\sum_{k=1}^n C_{i,k} \times L_{k,j}}{BW_i}$$

Où :

$E_{i,j}$ est l'exposition au contaminant j (ici cadmium) pour le sujet i,

$C_{i,k}$ est la consommation journalière moyenne de l'aliment k par le sujet i (k=1 à n),

$L_{k,j}$ est la teneur en contaminant j de l'aliment k,

BW_i est le poids corporel du sujet i.

Les poids corporels individuels ont été utilisés pour le calcul des expositions. De la même façon que dans l'EAT2, à chaque aliment consommé par un sujet a été assignée la moyenne des teneurs des échantillons de l'aliment issus de la région propre à chaque sujet (1 ou 2 échantillons pour chaque aliment, du fait de l'échantillonnage saisonnier) ou la moyenne des échantillons des autres régions (moyenne dite « nationale ») si l'aliment n'a pas été échantillonné dans la région en question. Lorsqu'aucune donnée de contamination n'était disponible pour un aliment, une teneur égale à zéro a été assignée.

Afin d'estimer l'impact des simulations à l'issue des différents scénarios issus de la première phase du modèle sur l'exposition du consommateur, la teneur en cadmium des aliments à base de blé et de la pomme de terre a été modifiée par rapport aux teneurs initiales, selon la méthode (Jean *et al.*, 2015) décrite plus bas en section 2.8.3.3.

Pour chaque scénario, ont été calculés, pour les adultes et les enfants :

- La moyenne d'exposition ainsi que le 95^{ème} centile (P95)
- Le pourcentage d'individus dépassant la VTR de 0,35 µg Cd.kg p.c⁻¹.j⁻¹ ainsi que son intervalle de confiance à 95% (IC_{95%}).

2.8.3.3 Conséquences de la modification des teneurs en cadmium dans les aliments à base de blé et pommes de terre

Afin de répercuter une modification de teneur sur les données de contamination de l'EAT2, la méthode développée en 2011 dans le cadre de la saisine 2011-SA-0194 relative à la révision des teneurs maximales en cadmium des denrées alimentaires (Anses, 2011b) (Jean *et al.*, 2015), et présentée ci-dessous a été appliquée.

Le principe est d'impacter les modifications (réductions ou augmentations) (%) de concentration de la plante (blé et pomme de terre) identifiées dans certains scénarios de la première phase du modèle sur la concentration des aliments tels que consommés, et d'estimer l'exposition totale du consommateur qui en résulte.

2.8.3.3.1 Aliments à base de blé

Dans la mesure où le blé n'est pas consommé comme un aliment mais qu'il sert d'ingrédient à de nombreux aliments, il était nécessaire d'identifier les aliments à base de blé, et d'impacter les modifications (taux de réduction ou augmentation) de teneurs aux ingrédients de chacun de ces aliments, pour lesquels on ne disposait pas de données de contamination dans l'EAT2.

Il était donc nécessaire de prendre en compte la part de blé dans les différents aliments consommés. Aussi, une table de décomposition des recettes spécifiquement développée dans INCA2³⁷ a-t-elle été croisée avec la table de consommation, afin de déterminer le pourcentage d'ingrédients à base de blé dans l'ensemble des aliments pris en compte dans le calcul d'exposition.

- **Aliments à base de blé tendre**

Pour les aliments à base de blé tendre, il est retenu les ingrédients sélectionnés en 2011 par les experts du CES ERCA : pétales de blé complet, blé ou froment, farine de blé t110, farine de blé t45 cuite, amidon de blé, blé ou froment complet, farine de blé diastasée, farine intégrale de blé, flocons de blé, son de blé.

Dans l'échantillonnage de l'EAT2, certains aliments ont été combinés (par exemple : les biscottes, pains suédois, croûtons... ont été combinés en un item « biscotte »). Pour ces aliments et pour chaque ingrédient, il a été considéré la part moyenne de chaque aliment dans le produit final, indépendamment de son poids dans l'échantillon, qui peut varier d'une région à l'autre par exemple.

Puis, pour chaque item alimentaire, la part totale des ingrédients à base de blé tendre a été calculée. Sur l'ensemble des 212 items alimentaires échantillonnés dans l'EAT2, 181 présentaient dans leur composition un des ingrédients ciblés.

Pour estimer l'impact des nouvelles teneurs sur l'exposition de la population, il a été considéré que la modification (réduction ou augmentation) (%) de la teneur moyenne des ingrédients à base de blé tendre était équivalente à la modification de la teneur moyenne du blé estimée dans la première phase du modèle.

Faute de données plus récentes et de facteurs de procédé, la teneur initiale des ingrédients à base de blé a été reprise du travail mené dans la saisine 2011-SA-0194 (Anses, 2011b). Pour l'ensemble des ingrédients, il a été considéré la teneur initiale de la farine de blé, excepté pour le son de blé qui est en général plus contaminé et pour lequel on disposait de données propres. Ont été considérées les teneurs moyennes de la farine de blé et de son de blé issue des données de l'Institut de recherches technologiques agroalimentaires des céréales (IRTAC). Les données comprenaient des résultats de 2000 à 2010 sur le blé tendre sous forme de farine (n=2861) et de son de blé (n=478). Ainsi, pour la farine de blé, il a été considéré des concentrations moyennes de 0,023 mg.kg⁻¹ en LB et 0,031 mg.kg⁻¹ en UB. Pour le son de blé, il a été considéré des concentrations moyennes de 0,069 mg.kg⁻¹ en LB et 0,074 mg.kg⁻¹ en UB.

Aussi, la contamination « corrigée » des aliments a été estimée comme suit :

$$C_{\text{cor,alim}} = C_{\text{init,alim}} - \%_{\text{ing}} \times C_{\text{init,ing}} \times \%_{\text{modification,ing}} - \%_{\text{son}} \times C_{\text{init,son}} \times \%_{\text{modification,son}}$$

Où,

$C_{\text{cor,alim}}$ = contamination corrigée de l'aliment (après application de la modification de teneur)

$C_{\text{init,alim}}$ = contamination initiale de l'aliment (dans EAT2)

$\%_{\text{ing}}$ = pourcentage d'ingrédients à base de blé (équivalent farine de blé)

$C_{\text{init,ing}}$ = contamination moyenne initiale de la farine

³⁷ AFSSA. La base de recettes INCA 2 – Rapport d'activité de l'AFSSA 2009.

$\%_{\text{modification,ing}}$ = modification de la contamination moyenne de la farine après application de la modification de teneur

$\%_{\text{son}}$ = pourcentage de son de blé dans l'aliment

$C_{\text{init,son}}$ = contamination moyenne initiale du son de blé

$\%_{\text{modification, son}}$ = modification de la contamination moyenne du son de blé après application de la modification de teneur

- **Aliments à base de blé dur**

De la même façon que pour le blé tendre, pour répercuter une modification de teneur pour le blé dur sur les données de contamination de l'EAT2, il a été pris en compte la part de blé dur dans les différents aliments. La table des recettes a été croisée avec la table de consommation afin de déterminer le pourcentage des ingrédients à base de blé dur dans l'ensemble des aliments pris en compte dans le calcul d'exposition. Quatre ingrédients étaient disponibles : le blé dur précuit grains entiers sec, la semoule crue, le couscous (graine seule) semoule cuite et les pâtes alimentaires cuites. Il a été considéré en accord avec les experts que les pâtes alimentaires étaient constituées à 100% de blé dur (sans facteur de conversion du blé vers la farine). Enfin, dans la mesure où ces ingrédients sont consommés cuits, il a été considéré pour chacun une proportion comestible de 3, c'est-à-dire que la masse d'aliments et d'ingrédients consommés cuits (donc réhydratés) était égale à trois fois la masse d'aliments avant cuisson.

Pour estimer l'impact des nouvelles teneurs sur l'exposition de la population, il a été considéré que la modification (%) de la teneur moyenne des ingrédients à base de blé dur était équivalente à la modification de la teneur moyenne du blé estimée lors de la première phase du modèle.

Aussi, la contamination « corrigée » des aliments a été estimée comme suit :

$$\begin{aligned} C_{\text{cor,alim}} &= C_{\text{init,alim}} - \%_{\text{ing}} \times C_{\text{init,ing}} \times \%_{\text{modification,ing}} \\ &= C_{\text{init,alim}} - \%_{\text{ing}} \times C_{\text{init,blé}} \times 1/3 \times \%_{\text{modification,ing}} \end{aligned}$$

Où,

$C_{\text{cor,alim}}$ = contamination corrigée de l'aliment (après application de modification de teneur)

$C_{\text{init,alim}}$ = contamination initiale de l'aliment (dans EAT2)

$\%_{\text{ing}}$ = pourcentage d'ingrédients à base de blé dur

$C_{\text{init,ing}}$ = contamination moyenne initiale des ingrédients à base de blé dur

$\%_{\text{modification,ing}}$ = modification de la contamination moyenne du blé dur après application de la modification de teneur

$C_{\text{init,blé}}$ = contamination moyenne initiale du blé dur

De la même façon que pour le blé tendre, faute de données plus récentes et de facteurs de procédé, la teneur initiale du blé dur a été reprise du travail mené dans la saisine 2011-SA-0194 (Anses, 2011b). Les données fournies par l'interprofession ont été utilisées : l'organisation professionnelle unitaire de la coopération agricole (Coop de France) (n=89 résultats de 2000 à 2009) et l'Institut du végétal (Arvalis) (n=397 résultats de 2009 et 2010).

Ainsi, pour le blé dur, il a été considéré une concentration moyenne de 0,085 mg.kg⁻¹ quelle que soit l'hypothèse de traitement des données censurées.

- **Aliments à base de blé tendre et de blé dur**

Pour les aliments contenant à la fois des ingrédients à base de blé tendre et de blé dur, les deux formules ont été combinées comme suit :

$$C_{\text{cor,alim}} = C_{\text{init,alim}} - \%_{\text{ing}} \times C_{\text{init,ing}} \times \%_{\text{modification,ing}} - \%_{\text{son}} \times C_{\text{init,son}} \times \%_{\text{modification,son}} - C_{\text{init,alim}} - \%_{\text{ing,blé dur}} \times C_{\text{init,blé dur}} \times 1/3 \times \%_{\text{modification,ing}}$$

Où,

$C_{\text{cor,alim}}$ = contamination corrigée de l'aliment (après application de la modification de teneur)

$C_{\text{init,alim}}$ = contamination initiale de l'aliment (dans EAT2)

$\%_{\text{ing}}$ = pourcentage d'ingrédients à base de blé tendre (équivalent farine de blé)

$C_{\text{init,ing}}$ = contamination moyenne initiale de la farine

$\%_{\text{modification,ing}}$ = modification de la contamination moyenne de la farine ou du blé dur après application de la modification de teneur

$\%_{\text{son}}$ = pourcentage de son de blé dans l'aliment

$C_{\text{init,son}}$ = contamination moyenne initiale du son de blé

$\%_{\text{modification,son}}$ = modification de la contamination moyenne du son de blé après application de la modification de teneur

$\%_{\text{ing,blé dur}}$ = pourcentage d'ingrédients à base de blé dur

$C_{\text{init,blé dur}}$ = contamination moyenne initiale du blé dur

2.8.3.3.2 Pomme de terre

Dans le cas de la pomme de terre, la modification (réduction ou augmentation) (%) de teneur de la plante issue de la première phase du modèle a directement été appliquée aux teneurs des aliments suivants dans l'EAT2 : « pomme de terre sautée ou frite », « pomme de terre cuite à l'eau », « purée de pomme de terre ». Il n'a pas été souhaité dans ce travail que la table de décomposition des recettes d'INCA2 soit utilisée. Les aliments contenant de la pomme de terre dans leur recette (par exemple le hachis Parmentier) n'ont donc pas été considérés. A noter que, dans le cas d'une réduction de la concentration en cadmium, ce choix est protecteur dans la mesure où, la réduction de concentration n'ayant pas été appliquée, l'exposition initiale liée à la consommation de ces aliments est conservée, et donc l'exposition totale est surestimée.

La formule suivante a été utilisée :

$$C_{\text{cor,alim}} = C_{\text{init,alim}} \times \%_{\text{modification,ing}}$$

Où,

$C_{\text{cor,alim}}$ = contamination corrigée de l'aliment (après application de la modification de teneur)

$C_{\text{init,alim}}$ = contamination initiale de l'aliment (dans EAT2)

$\%_{\text{modification,ing}}$ = modification de la contamination moyenne de la pomme de terre

2.9 Résultats de la modélisation

2.9.1 Principe

Dans un premier temps, il a été réalisé le bilan massique relatif aux simulations liées aux différents apports d'engrais minéraux phosphatés (vingt scénarios d'itinéraire de fertilisation) à l'aide du modèle mathématique construit sur la base d'une approche « mass-balance » afin de calculer le devenir du cadmium (accumulation dans les sols, transferts vers les eaux lixiviées ou les végétaux) ; le modèle étant d'abord finalisé pour l'usage des engrais minéraux phosphatés pour lesquels des données maîtrisées sont disponibles. En complément, l'application R-shiny a permis de vérifier le bilan de masse de chaque scénario testé. Les données de sortie du modèle probabiliste développé correspondent à des simulations de type Monte-Carlo et permettent d'obtenir, de 1 à 99 ans, la distribution et la moyenne des concentrations en cadmium dans les différentes matrices sol (horizons de surface) – plantes (grain de blé et pomme de terre) - eau lixiviée en fonction des itinéraires de fertilisation (apport d'engrais phosphatés variables selon un itinéraire monoculture blé ou rotation pomme de terre-blé-blé) ainsi que les hypothèses de seuils en cadmium, constants dans le temps (90, 60, 40, 20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹) ou dégressifs liés aux scénarios réalistes testés. Des pourcentages de variations des teneurs en cadmium sont alors calculés dans les diverses matrices au cours du temps de projection, par rapport à la première année d'apport de référence pour chaque scénario, sur la base des distributions et de la moyenne des teneurs en cadmium modélisées dans les matrices. Ces pourcentages servent d'appui à l'interprétation des résultats des simulations liées à l'étude de l'évolution de la contamination en cadmium dans les matrices sol-plante-lixivié le long de la projection par rapport à la première année d'apport en fonction des itinéraires de fertilisation d'emploi des engrais minéraux phosphatés et donc des apports en cadmium associés.

Les résultats obtenus à l'issue du bilan massique dans les matrices (sol, plante (grain de blé, pomme de terre), lixivié) au cours du temps de projection pour chaque simulation sont présentés en annexe 3 (distribution et moyenne des concentrations en cadmium calculées le long du temps de projection de la simulation dans les matrices) et annexe 4 (pourcentage de variation (distribution et moyenne) dans les matrices au cours du temps de projection de la simulation par rapport à la première année d'apport).

De plus, des figures sous forme de boîtes à moustache (*boxplots*) présentant les pourcentages de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75 et P95) et de la moyenne des niveaux de contamination modélisés dans les matrices sol-culture-eau lixiviée, en fonction du temps (résultats présentés pour 10, 20, 60 et 99 ans de projection) par rapport à la première année d'apport de référence, suivant l'itinéraire de fertilisation (monoculture blé et rotation pomme de terre-blé-blé) et des teneurs en cadmium testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹) ont été réalisées pour faciliter la lecture et la compréhension des résultats (figure 13). Ces boxplots ont servi d'appui dans l'analyse des résultats. Ces boxplots dérivés des résultats des simulations liées aux scénarios relatifs aux différents apports d'engrais minéraux phosphatés sont également visibles en annexe 4.

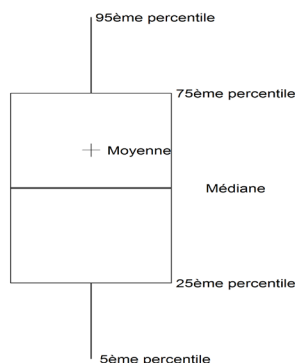


Figure 13. Représentation schématique de l'interprétation des résultats des pourcentages de variations identifiés pour les matrices sol-culture-lixivié issus de la modélisation par rapport à la première année de référence sous forme de boxplots

Dans un second temps, il est modélisé l'impact d'une action à la source, en l'occurrence une réduction des teneurs en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés, sur l'exposition chronique des consommateurs, à la suite de l'actualisation du modèle de l'Anses (2011-SA-0194). Il y est notamment répercuté les plus forts pourcentages de réduction, sur la base de la moyenne de la concentration en cadmium dans les plantes (blé et pomme de terre) identifiées préalablement à l'issue de certaines simulations, sur la concentration des aliments tels que consommés. Cela permet d'estimer l'impact le plus important en termes d'exposition au cadmium pour le consommateur. Il y est notamment comparé l'effet sur l'exposition chronique du consommateur de simulations liées à un abaissement des teneurs en cadmium dans les engrais phosphatés (engendrant les plus forts pourcentages de réduction de concentrations en cadmium dans la culture au cours du temps de projection) avec celles liées au maintien du seuil en cadmium actuel réglementaire de 90 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹. Les données de sorties permettent de dériver l'exposition chronique moyenne et au 95^{ème} centile pour le consommateur adulte et enfant ainsi que d'identifier potentiellement un pourcentage de dépassement de la VTR, en fonction du temps de projection de la modélisation (10, 20, 60 et 99 ans).

Dans un troisième temps, le transfert de cadmium issu des apports d'engrais phosphatés minéraux des sols vers les cultures et les eaux de lixiviation doit être comparé aux flux entrants dans les sols par d'autres MFSC afin de discuter de façon plus complète les phénomènes d'accumulation du cadmium dans les divers compartiments. Il est comparé les résultats obtenus avec le modèle finalisé des simulations liés aux flux entrants en cadmium dans les sols agricoles correspondant aux 20 scénarios d'itinéraires de fertilisations relatifs à l'usage d'engrais minéraux phosphatés testant différentes teneurs en cadmium dans le fertilisant avec ceux issus de flux en cadmium dérivés pour l'utilisation de fertilisants d'origine organique pour lesquels des données sont disponibles. Cette troisième partie de l'analyse des résultats est liée à l'étude de flux de cadmium apportées par les matières fertilisantes ; la question posée dans la saisine portant *in fine* sur les matières fertilisantes. Les flux de cadmium (exprimés en g.ha⁻¹ et par an) dépendent des quantités apportées aux sols et des concentrations mesurées dans les fertilisants. En complément de teneurs en cadmium à tester dans le fertilisant (notamment dans le cas des engrais minéraux phosphatés disposant de données maîtrisées), le fait de raisonner en flux d'apport présente un intérêt pour l'utilisateur, quelles que soient les matières fertilisantes utilisées. Cela permet à l'agriculteur d'agir quantitativement et temporellement sur les flux d'apport en élément au regard de la gestion durable des flux d'apport en cadmium vers les sols agricoles et les cultures. Le raisonnement par flux représente un intérêt, particulièrement lorsque la source d'origine du cadmium dans la matière fertilisante peut difficilement être maîtrisable. Le modèle mathématique construit intégrant finalement des flux entrants en cadmium par les intrants agronomiques comme données d'entrées, son utilisation est *in fine* élargie à des simulations associées à des itinéraires de fertilisation liés à des sources d'apports en cadmium par les fertilisants autres que les engrais minéraux phosphatés. Dans ce travail, les flux entrants en cadmium possibles dérivés pour les fertilisants d'origine organiques sont testés dans le modèle mathématique mis en œuvre sous R-shiny et les résultats en découlant analysés et comparés entre l'ensemble des fertilisants testés dans le modèle (engrais minéraux phosphatés, fertilisants d'origine organique).

Les niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles, la contamination des cultures et l'exposition du consommateur qui seront proposés découleront de l'analyse des trois étapes explicitées ci-dessus. Cela résultera de l'analyse des résultats issus des bilans massiques et du calcul de l'exposition alimentaire associé du modèle suivant les apports entrants en cadmium des divers scénarios de fertilisations des matières fertilisantes testés (selon les teneurs en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés et flux d'apport en cadmium des matières fertilisantes d'origine minérale phosphatée et d'origine organique étudiés dans le modèle).

Par ailleurs, en complément des itinéraires de fertilisation testés dans le modèle, il a aussi été modélisé un scénario sans apport de cadmium par les intrants agronomiques (les apports en cadmium dans ce scénario sont uniquement liés aux dépôts atmosphériques et eaux d'irrigation s'ajoutant à la présence du fond géochimique). Les résultats modélisés dans les matrices sol-culture-lixiviat (pourcentage de variation (distribution et moyenne) dans les matrices au cours du temps de projection de la simulation par rapport à la première année d'apport) avec ce scénario lié à zéro apport en cadmium par les intrants agronomiques sont présentés en annexe 6.

2.9.2 Vérification de la pertinence du modèle mathématique

En préambule de l'analyse des résultats, la pertinence prédictive du modèle a été évaluée au regard des concentrations en cadmium dans le sol, le blé, la pomme de terre et le lixiviat générées par le modèle mathématique au début des simulations.

Au regard des concentrations retrouvées dans les sols, les concentrations en cadmium calculées dans les sols (cf annexe 3) liées au bruit de fond pédo-géochimique sont cohérentes avec celles observées en France (RMQS-GIS SOL) et plus largement, avec celles des bases de données des sols européens GEMAS (Birke *et al.*, 2017) et LUCAS (Toth *et al.*, 2016) (cf section 2.7.2.1 – tableau 15). Ainsi, par exemple, les concentrations moyenne et médiane modélisées sont de 0,3 et 0,2 mg Cd. kg⁻¹ de sol. D'après les bases de données RMQS et BDETM (France entière), les concentrations nationales moyennes des horizons de surface des sols français sont de 0,30 et 0,39 mg.kg⁻¹ respectivement et les médianes nationales en cadmium dans les sols de 0,19 et 0,3 mg.kg⁻¹ respectivement ; tandis que la base européenne GEMAS (Birke *et al.*, 2017) présente une concentration médiane en cadmium des sols européens de 0,18 mg.kg⁻¹.

Pour les concentrations en cadmium modélisées dans les cultures à un instant t (cf annexe 3) à partir d'un jeu de combinaisons de sols, le tableau ci-dessous montre que les données de concentrations en cadmium calculées grâce au modèle pour le blé et la pomme de terre sont du même ordre de grandeur (même si significativement plus élevées) que les teneurs rapportées dans ces mêmes cultures par l'Efsa (2009), dans les plans de surveillance et de contrôle réalisés en France durant la période 2010-2015 et que les valeurs précédemment modélisées par Römken *et al.* (2017).

Tableau 21. Comparaison entre les concentrations en cadmium (exprimées en mg Cd. kg⁻¹ de partie comestible de la plante) calculées avec le modèle mathématique de la saisine avec celles précédemment prédites par Römken *et al.* (2017) ou mesurées dans les grains de blé et pomme de terre au niveau français par les plans de surveillance et de contrôle (PS/PC) (années 2010 à 2015) et au niveau européen (Efsa, 2009)

Culture	Modèle de la saisine (2018)			Modèle Römken <i>et al.</i> (2017)			Efsa (2009)			Données PS/PC de la DGCCRF (années 2010-2015)
	P05	P50	P95	P05	P50	P95	P05	P50	P95	P50
Blé (grain)	0,03	0,07	0,20	0,03	0,06	0,14	0,005	0,02	0,08	0,02
Pomme de terre	0,02	0,04	0,08	0,004	0,009	0,03	0,005	0,02	0,07	0,01

*Les valeurs en gras indiquent les concentrations maximales en cadmium pour chaque condition.

Quant aux concentrations en cadmium dérivées dans les lixiviats avec le modèle, les données de sorties obtenues pour la lixiviation montrent des résultats sensiblement similaires aux seules données indiquées par Smolders et Six (2013) : le modèle présente une teneur moyenne de cadmium lixivié maximale pour chaque simulation de 2,4 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹ (cf annexe3) tandis que Smolders et Six rapportent une lixiviation moyenne en Europe de 2,56 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹.

Par conséquent, le modèle mathématique élaboré constitue un support prédictif cohérent pour estimer en fonction de scénarios réalistes d'apports de cadmium au sol l'évolution de la part de cadmium lixivié, ainsi que l'évolution des niveaux de contamination en cadmium dans les sols agricoles, dans les plantes (blé et pomme de terre) et dans les produits alimentaires finaux apparentés. La méthode permet, *in fine*, d'estimer le risque sanitaire associé.

En complément, l'algorithme programmé et mis en application sous R-shiny pour l'utilisateur dispose d'un onglet permettant de vérifier le bilan massique. Ainsi, le bilan de masse de chaque simulation a pu être vérifié.

2.9.3 Etude de l'évolution de la contamination en cadmium des sols pour les différents itinéraires de fertilisation en fonction des apports d'engrais minéraux phosphatés et de leurs teneurs en cadmium

Les simulations réalisées avec les différents itinéraires de fertilisation mettent en évidence des variations de la teneur en cadmium dans les sols, en fonction notamment des concentrations en cadmium des engrais minéraux phosphatés et des durées de projection examinées (de 10 ans à 99 ans). Ci-dessous sont présentés des boxplots qui servent d'appui à l'analyse des résultats en plus des résultats présentés en annexes 3 et 4. La figure 13 en section 2.9.1 rappelle la légende explicative liée à la lecture des boxplots.

Dans le cas de l'itinéraire monoculture blé avec un apport d'engrais phosphaté à raison de $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ (figure 14), les teneurs de cadmium dans les sols augmentent de façon significative (environ 10% de variation), dès 10 ans, sauf lorsque la teneur en cadmium dans les engrais est inférieure ou égale à $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$. Ce phénomène est plus marqué avec les engrais les plus concentrés en cadmium à savoir 90 et $60 \text{ mg} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans les engrais et avec la période d'observation : après 99 ans d'épandage, des augmentations significatives dans les sols sont observées pour toutes les concentrations en cadmium testées. Ainsi, par exemple pour une concentration de $90 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans les engrais, 90% des simulations à 99 ans conduisent à des augmentations de Cd supérieures à 10% dans les sols, alors que si la concentration en cadmium est de $20 \text{ mg} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans les engrais, l'augmentation n'est observée que dans 10% des situations (cf. tableau 4.1.1-1 en annexe 4). En considérant les variations moyennes, des augmentations significatives (14%) n'apparaissent qu'à partir de 20 ans pour une concentration dans les engrais de $90 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$.

En considérant les variations moyennes, seule une concentration en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés apportés au sol inférieure à $20 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ pour un apport d'engrais phosphaté de $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ permet de ne pas augmenter les teneurs en cadmium dans les sols, de manière significative (plus de 10%), à long terme.

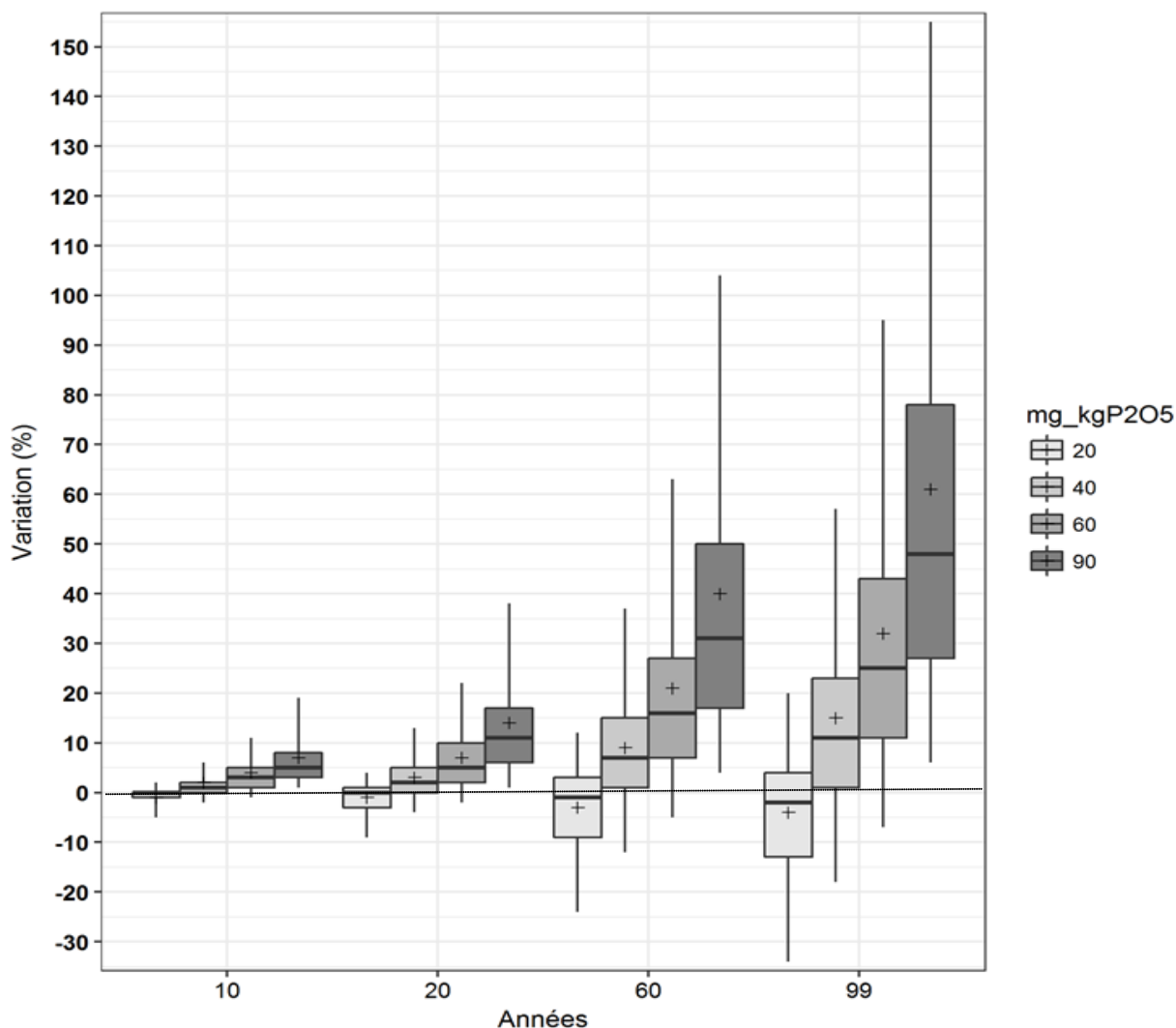


Figure 14. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, de l'accumulation du cadmium dans le sol en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 80 kg P₂O₅.ha⁻¹.an⁻¹ et des teneurs en cadmium constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

En cas d'impasse (figure 15), c'est à dire le scénario pour lequel un seul apport d'engrais minéral phosphaté est réalisé sur 3 ans, la tendance décrite précédemment avec des apports systématiques annuels en monoculture blé reste valide, mais les variations de teneurs en cadmium mettent plus de temps à devenir significatives. Ainsi, les augmentations de teneurs en cadmium dans le sol par rapport à l'état initial ne sont significatives qu'après 60 ans pour au maximum 25% des situations pour des concentrations en cadmium dans les engrais de 60 et 90 mg Cd. KgP₂O₅⁻¹. Concernant les concentrations moyennes calculées dans les sols, seule la simulation utilisant une concentration de cadmium de 90 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹ met en évidence des augmentations significatives après 60 ans.

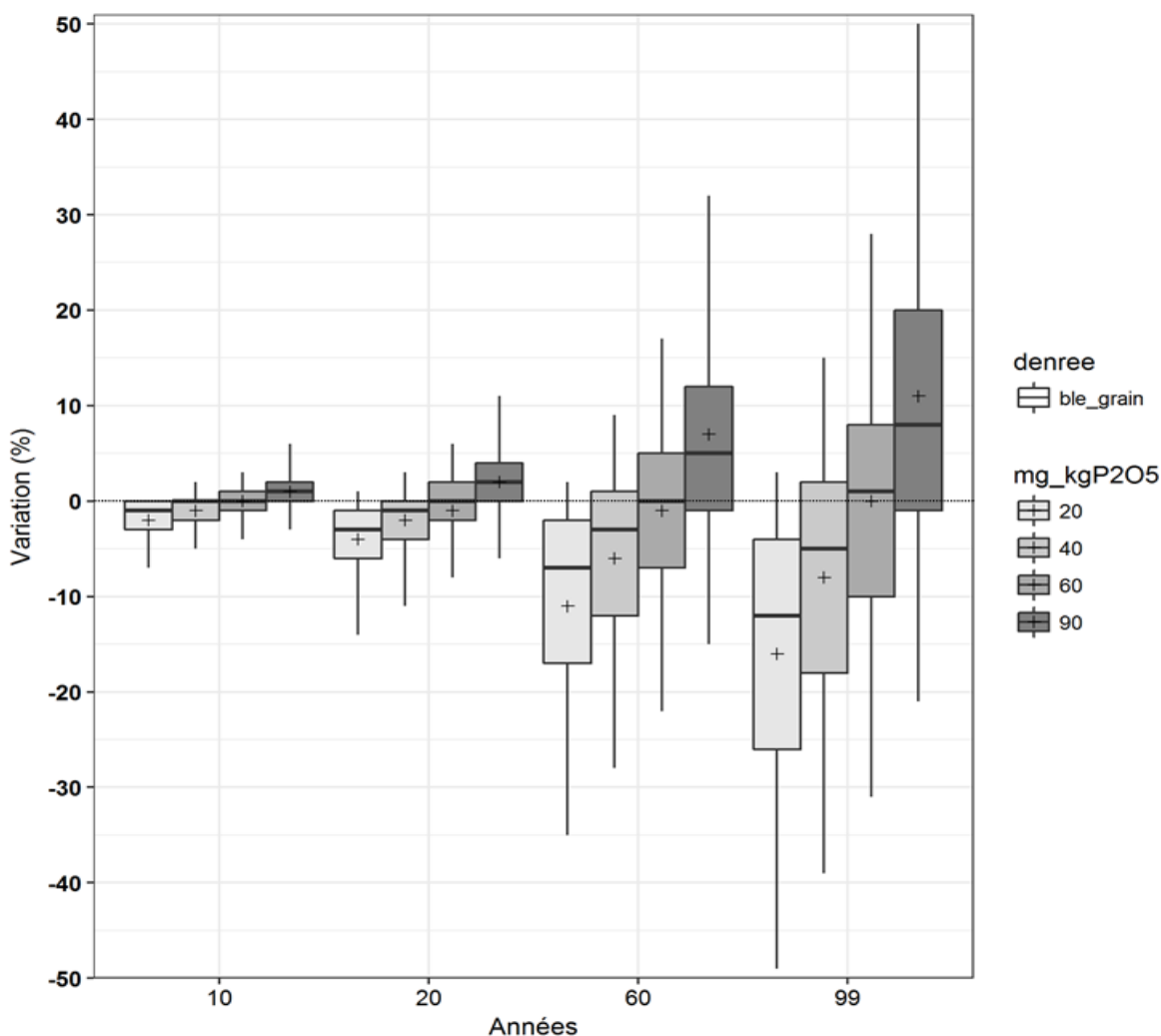


Figure 15. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, de l'accumulation du cadmium dans le sol en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 100 kg P₂O₅. ha⁻¹an⁻¹ suivi de 2 années d'impasse et des teneurs en cadmium constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

Les itinéraires modélisés avec des rotations pomme de terre/blé/blé, présentent les mêmes caractéristiques que ceux décrits précédemment. Cependant, des variations plus fortes sont mises en évidence, car la pomme de terre est une culture plus exigeante en phosphore qui nécessite des apports plus importants. Dès lors, même avec un scénario intégrant des impasses d'une durée de 2 ans suite à une année d'apport, des variations significatives sont mises en évidence beaucoup plus précocement (dès 10 ans). Pour ces simulations, seuls des engrais minéraux phosphatés contenant 20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹ permettent de limiter l'augmentation de la concentration de cadmium dans les sols dans la plupart des situations (annexe 4).

Plusieurs itinéraires ont été testés en supposant la mise en place d'une réglementation imposant une concentration dégressive dans les engrais en fonction des années. Il a ainsi été modélisé la progression suivante : la teneur maximale en cadmium dans l'engrais minéral phosphaté est limitée à 60 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ les 3 premières années, puis à 40 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹ pendant 12 ans et enfin à 20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹ jusqu'à 99 ans. Dans ces conditions, pour une monoculture de blé avec des apports de 80 kg P₂O₅.ha⁻¹.an⁻¹ (itinéraire de fertilisation précédemment le moins favorable), la concentration dans les sols n'augmente de façon significative qu'après 60 ans dans 10% des situations puis, à 99 ans, dans 25% des situations (figure 16) (annexe 4). Les variations moyennes ne sont pas significatives (inférieures à la

hausse ou à la baisse de 10%). Ces observations sont confirmées sur les autres itinéraires. Les impasses permettent d'ailleurs de limiter encore plus l'augmentation de cadmium dans les sols (annexe 4).

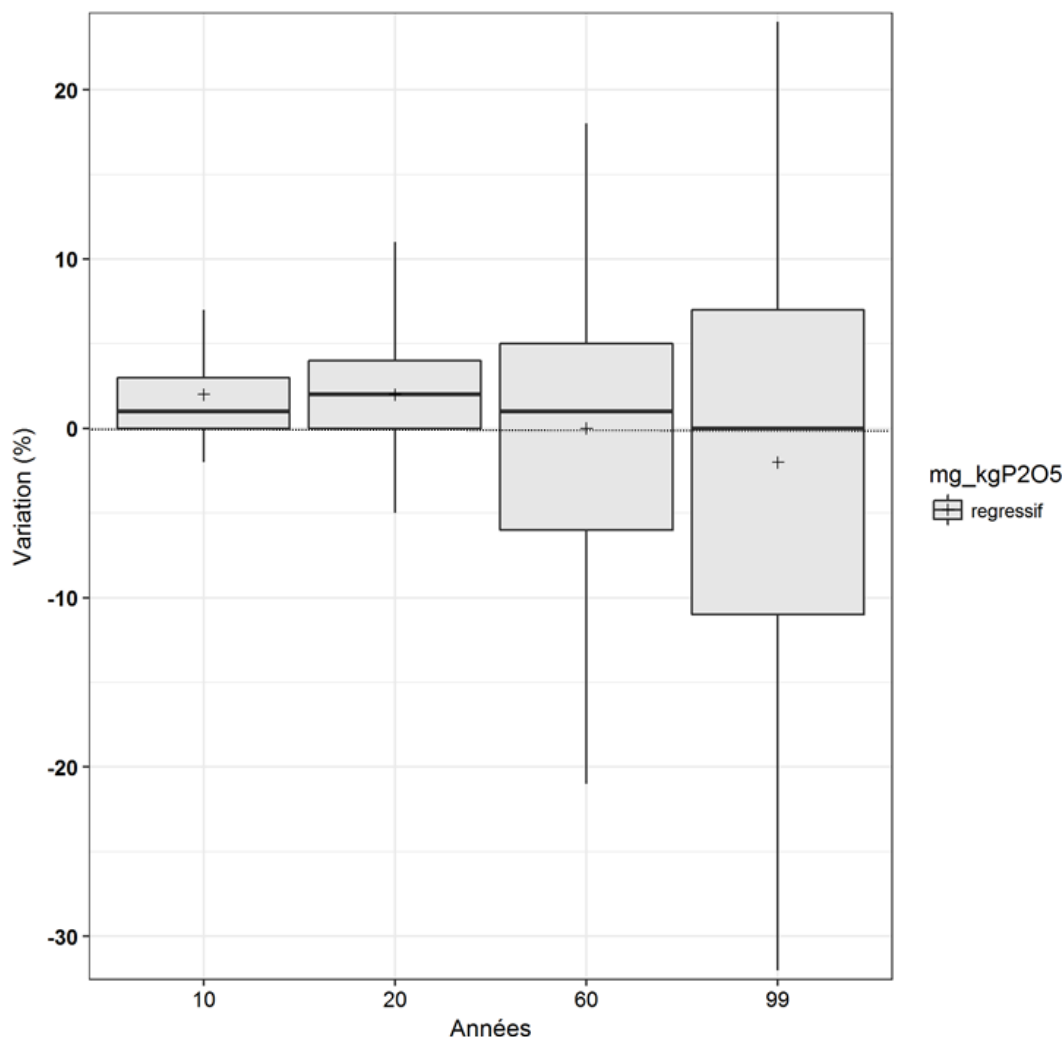


Figure 16. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, de l'accumulation du cadmium dans le sol en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation d'une monoculture de blé à 80 kg P₂O₅.ha⁻¹ an⁻¹ et des teneurs en cadmium dégressives au cours de la simulation dans l'engrais phosphaté (60 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹ pendant 3 ans, puis 40 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹ pendant 12 ans et 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹ jusqu'à 99 ans)

L'ensemble des données de sorties, valeurs calculées, pourcentages de variation dans la matrice et figures obtenus pour les sols est présenté pour chaque scénario lié à un itinéraire de fertilisation et une teneur en cadmium testée dans l'engrais minéral phosphaté en annexes 3 et 4.

L'étude de l'influence des caractéristiques des sols au regard de l'accumulation du cadmium dans les sols a été analysée par l'intermédiaire de l'application R-shiny. En comparant les traitements sur l'itinéraire de monoculture de blé, fertilisé par des apports de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹an⁻¹ (figure 17), les sols avec des pH acides ou ceux avec des pH basiques réagissent différemment par rapport à l'accumulation de cadmium (ce qui est cohérent avec les publications scientifiques disponibles).

Ainsi, ce sont toujours les sols acides qui présentent les situations dans lesquelles les concentrations en cadmium diminuent le plus lorsque les apports en cadmium entrés dans le modèle sont réduits. Lorsque les apports en cadmium sont plus importants (dès que la concentration en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés est supérieure à 40 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹), il est principalement observé des accumulations de celui-ci dans les sols, quel que soit le pH des sols. Cependant, avec un apport faible de 20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹ dans l'engrais minéral phosphaté, les concentrations en cadmium dans les sols acides diminuent après 99 ans tandis qu'elles augmentent dans les sols basiques. Les apports étant faibles par rapport aux exportations (lixiviation et transfert vers les plantes) en sols acides, la concentration en cadmium a tendance à diminuer dans le sol. En présence de sols basiques, les transferts étant moindres compte tenu de la spéciation du cadmium, celui-ci s'immobilise dans le sol.

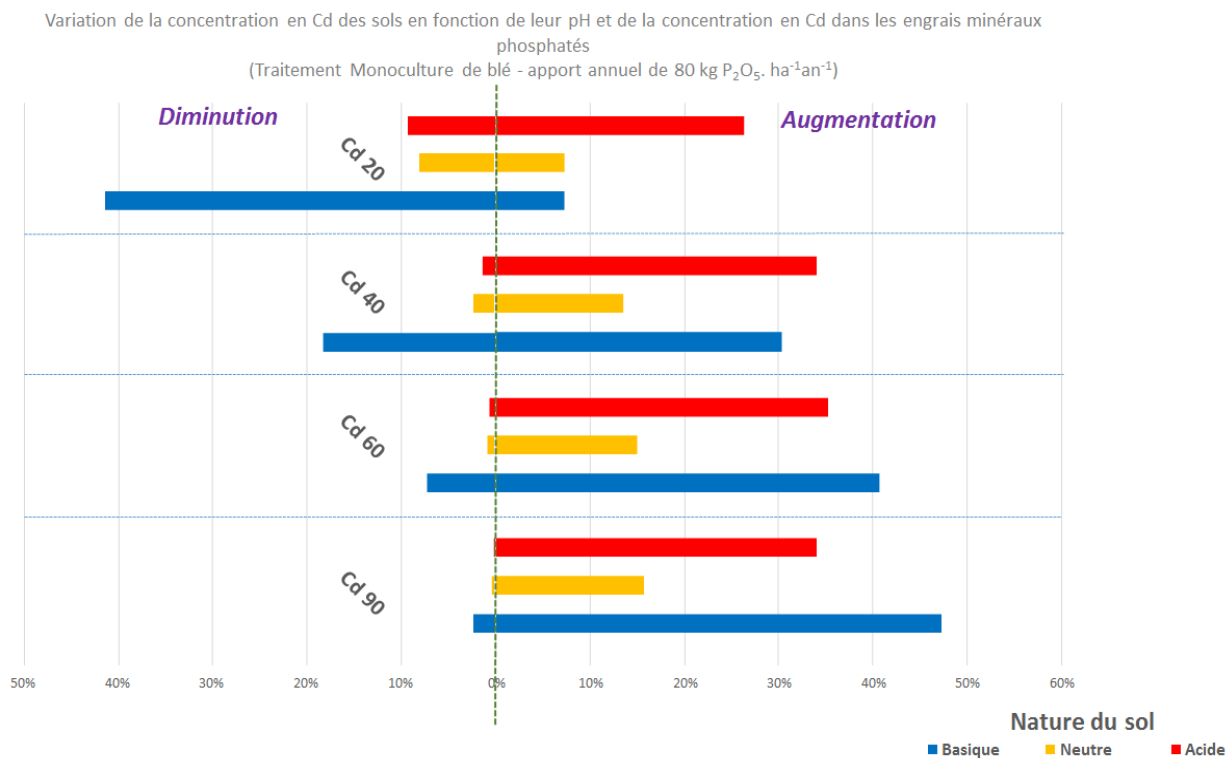


Figure 17. Variation de la concentration en cadmium dans les sols, en fonction de leur pH (acide, neutre ou basique) et de la concentration en cadmium des engrais minéraux phosphatés épandus (respectivement 90, 60, 40 et 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹) pour un itinéraire de fertilisation correspondant à une monoculture de blé à 80 kg P₂O₅. ha⁻¹an⁻¹

Par rapport aux travaux de Smolders et Six liés à ceux de Fertilizer Europe (2013), les variations de concentrations dans les sols, mesurées dans nos simulations sont plus importantes. En effet, dans le cadre également d'une approche mass-balance, ils mettent en évidence des variations maximales d'environ 45% et une variation moyenne quasi nulle à 100 ans pour des engrais présentant une concentration de 80 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹. Le travail de simulation réalisé dans le cadre de cette saisine met en évidence des variations maximales beaucoup plus fortes (jusque plus de 150%) et une variation moyenne à 99 ans comprise entre 15 et 61 % (selon que la concentration en cadmium dans les engrais épandus³⁸ soit de 40, 60 ou 90 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹). Plusieurs phénomènes se cumulent pour expliquer cette situation : ainsi par exemple, dans les simulations conduites dans cette saisine, la concentration

³⁸ Si la concentration dans l'engrais est de 20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹ la variation moyenne dans le sol est quasi nulle (-4%).

maximale de cadmium dans les engrais minéraux phosphatés est plus élevée (90 au lieu de 80 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹), l'apport d'engrais est également plus important car correspondant à une situation française et non pas une moyenne européenne (80 au lieu de 21 kg P₂O₅. ha⁻¹an⁻¹), le pH des sols évolue entre 4,5 et 8,7 alors qu'il n'est compris qu'entre 4,5 et 7,5 dans les simulations de Smolders et Six (2013). Dès lors, cela explique les plus faibles variations constatées par Smolders et Six (2013) qui considèrent des situations moyennes, alors que le présent travail s'appuie sur une diversité de cas, en prenant en compte notamment des situations plus défavorables (exemples : sols pauvres en phosphore nécessitant une fertilisation plus importante, ou sols pauvres en cadmium à pH basique où des apports même faibles de cadmium peuvent générer une accumulation). En ce sens, les résultats obtenus dans ce travail concordent avec ceux de Römken *et al.* (2017)³⁹ qui font également le constat que les concentrations en cadmium dans les engrais phosphatés, supérieures à 20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹ entraînent, sur 100 ans, des accumulations significatives de cadmium dans les sols de culture et de prairie (jusqu'à 11% en moyenne). Cependant, ils prédisent en fonction des caractéristiques du sol (exemple : pH > 7) et de leurs usages (exemple : sols cultivés qui sont plus amendés) des accumulations plus importantes (qui peuvent dépasser 30%) dans les sols.

2.9.4 Etude de l'évolution de la contamination en cadmium des cultures pour les différents itinéraires de fertilisation en fonction des apports d'engrais minéraux phosphatés et de leurs teneurs en cadmium

L'étude des résultats des simulations réalisées avec les différents itinéraires de fertilisation montrent des variations de la teneur en cadmium dans les cultures, en fonction notamment des concentrations en cadmium des engrais minéraux phosphatés et des durées de projection examinées (de 10 ans à 99 ans).

Dans le cas de l'itinéraire monoculture blé, avec un apport d'engrais de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et des seuils en cadmium constants testés dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg Cd.kgP₂O₅⁻¹), il est observé une réduction de la teneur en cadmium dans le grain de blé sur la durée de projection lorsque la concentration en cadmium dans l'engrais phosphaté testée est de 20 mg Cd.kgP₂O₅⁻¹.

Pour les autres concentrations en cadmium dans les engrais phosphatés étudiées (90, 60 et 40 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹), une accumulation du cadmium dans le grain de blé est observé (Figure 18). Ainsi, par exemple, sur la base de l'observation de la distribution des pourcentages de variation par rapport à la première année d'apport, pour une concentration de 90 mg Cd. kg⁻¹ P₂O₅ dans les engrais, 90% des simulations au bout de 99 ans conduisent à des augmentations significatives du transfert dans le grain de blé supérieures à 10% alors que si la concentration est fixée à 20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹ dans les engrais, l'augmentation n'est observée que dans 25% des situations (annexe 4). En considérant la moyenne des situations, le constat est le même : des augmentations significatives des teneurs en cadmium dans le grain de blé ne sont observées que pour des concentrations en cadmium dans les engrais supérieures ou égales à 40 mg Cd.kgP₂O₅⁻¹.

³⁹ Römken P., De Vries W. and Kros H. 2017. Dynamic Cadmium balances in arable soils and grassland soils in the EU: impact of revision of fertiliser regulation on accumulation rates and levels of Cd in soils – preliminary results as of June 14, 2017 - Wageningen Environmental Research (Alterra) <https://cdn2.hubspot.net/hubfs/2828618/downloads/dynamic-cadmium-balances-in-arable-soils-and-grassland-soils-in-the-eu.pdf?t=1509722697959>

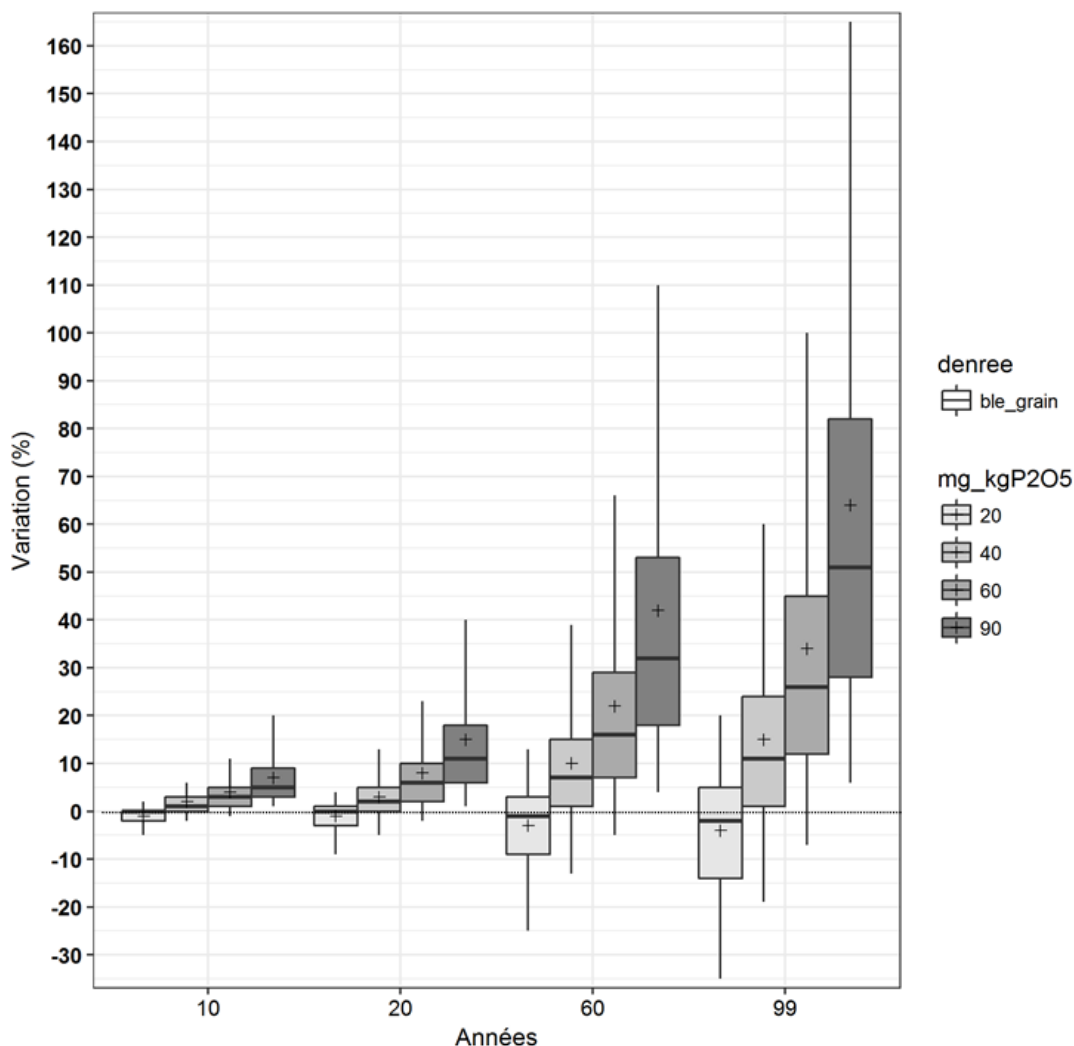


Figure 18. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, du transfert du cadmium vers le blé (grain) en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 80 kg P₂O₅.ha⁻¹an⁻¹ et des teneurs en cadmium constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd.kgP₂O₅⁻¹)

En revanche, dans le cas d'un scénario avec un itinéraire monoculture blé avec une dose d'apport d'engrais de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et en présence de seuils en cadmium constants le long de la modélisation (90, 60, 40, 20 mg Cd.kgP₂O₅⁻¹), il est constaté une réduction plus marquée du transfert du cadmium vers le grain de blé (figure 19). Il est observé, sur la base des distributions et de la moyenne des teneurs en cadmium modélisées dans la plante, une réduction significative du transfert de cadmium vers le blé (grain) dès 10 ans pour les engrais phosphatés avec une concentration de 40 et 20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹. Puis, la diminution du transfert du cadmium vers le grain de blé s'accroît avec la teneur en cadmium dans l'engrais phosphaté abaissée à 20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹ avec une réduction moyenne du transfert à hauteur de 1% au bout de 10 ans jusqu'à 15 % au bout de 99 ans ; comparée à l'observation d'un transfert moyen quasi nul (0%) jusqu'à 99 ans en présence d'une concentration en cadmium de 60 mg Cd.kgP₂O₅⁻¹ testée dans l'engrais phosphaté (annexe 4). Ces observations sont liées au fait que le flux d'apport dans les sols rapportés à l'année est moins important que dans la situation précédente, entraînant ainsi un recul plus marqué du transfert du cadmium vers la plante.

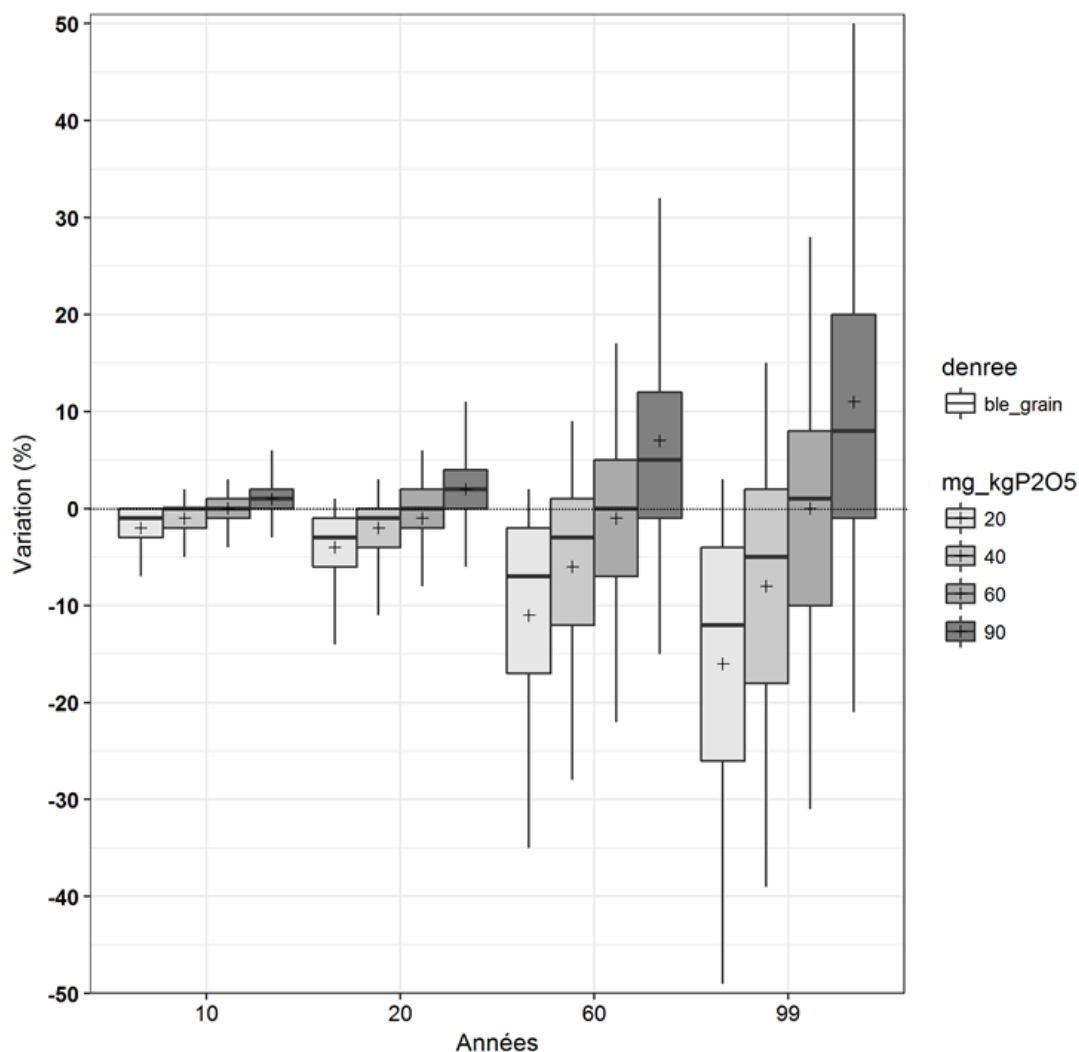


Figure 19. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, du transfert du cadmium vers le blé (grain) en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 100 kg P₂O₅.ha⁻¹.an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et des teneurs en cadmium constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

Dans le cas de simulations liées à des itinéraires de fertilisation impliquant une rotation pomme de terre-blé-blé, les mêmes observations que précédemment sont effectuées. En présence d'un apport d'engrais de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et seuils en cadmium constants le long de la modélisation, il est observé une tendance à la réduction de la teneur en cadmium dans le grain de blé et la pomme de terre sur la durée de projection uniquement lorsque la concentration en cadmium dans l'engrais phosphaté testée est de 20 mg Cd.kgP₂O₅⁻¹. De même, avec un apport d'engrais de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et en présence de seuils en cadmium constants le long de la modélisation, une baisse de transfert du cadmium vers la plante est observée dès une teneur en cadmium dans l'engrais phosphaté de 60 mg Cd.kgP₂O₅⁻¹. Il est observé également, sur la base des distributions et de la moyenne, une réduction significative du transfert de cadmium vers le blé (grain) et la pomme de terre dès 10 ans pour les engrais phosphatés avec des teneurs de 40 et 20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹. En présence d'un itinéraire contenant un temps d'impasse, de même que précédemment, la réduction du transfert est plus marquée liée à des flux d'apports rapportés à l'année plus faibles (annexes 3 et 4).

Néanmoins, il est remarqué qu'au cours des différentes simulations avec des seuils en cadmium nettement abaissés dans l'engrais (40 et 20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹) et au cours du temps de projection que, la réduction du transfert du cadmium est un peu plus marquée vers le grain de blé que vers la pomme de terre (annexe 4, figure 20). La pomme de terre est une espèce exigeante en phosphore, en même temps que le phosphore est prélevé par ce légume-tubercule, une fraction phytodisponible du cadmium sera directement prélevée et transférée vers la partie consommée par l'Homme ; comparée au blé, espèce entraînant moins la translocation du cadmium des racines vers le grain.

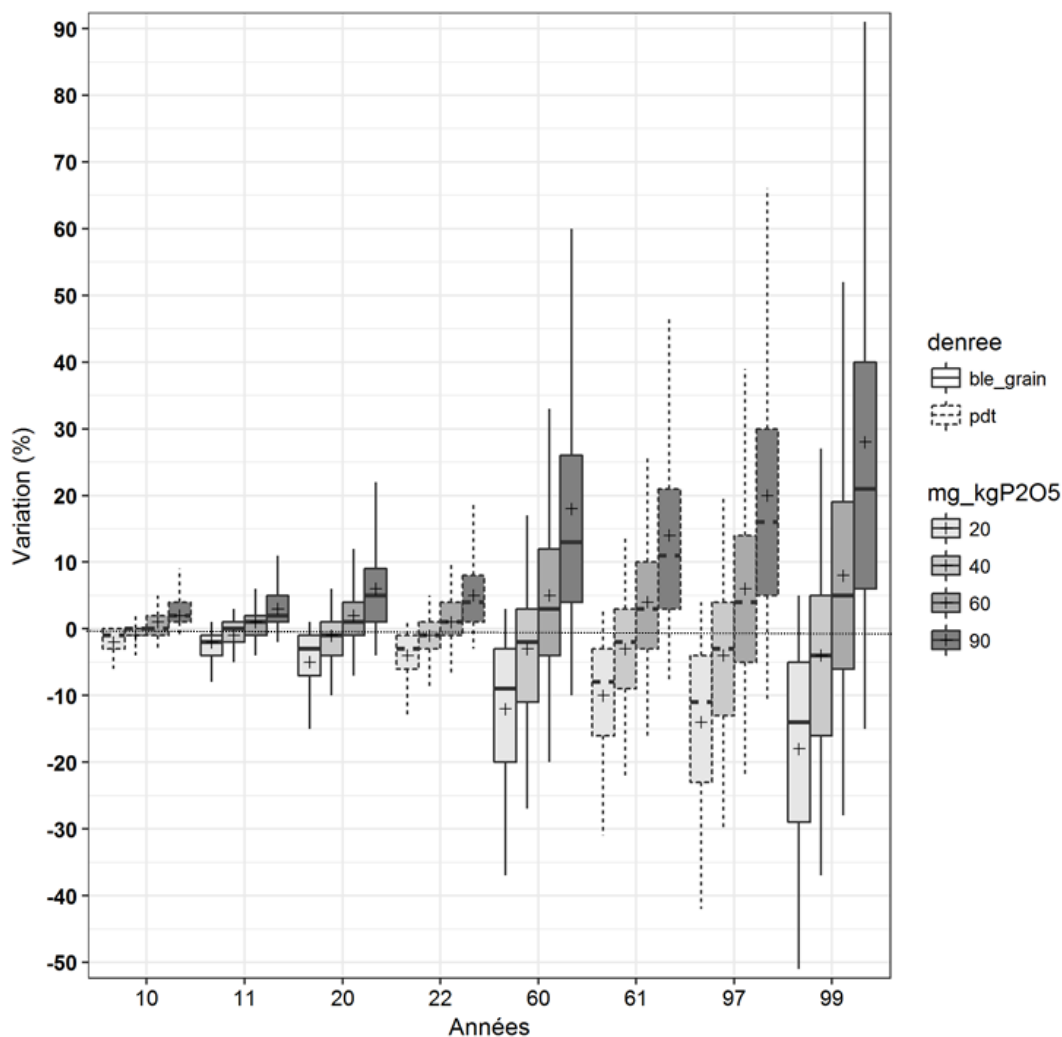


Figure 20. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, du transfert du cadmium vers le blé (grain) et la pomme de terre en fonction du temps de projection (10, 11, 20, 22, 60, 61, 97, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation rotation 180 kg P₂O₅.ha⁻¹.an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et des teneurs en cadmium constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

Les simulations réalisées avec des seuils en cadmium dégressifs au cours du temps (60 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport puis une réduction de ce seuil à 40 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans et à terme à 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ montrent des résultats similaires pour les concentrations en cadmium modélisées pour le grain de blé et la pomme de terre avec celles observées pour des scénarios avec des seuils en cadmium constants le long de la modélisation à 20 mg Cd.kg⁻¹ P₂O₅, que

ce soit dans le cas de scénarios monoculture blé ou en rotation et quelle que soit la dose d'apport en phosphore apportée (annexes 3 et 4).

L'ensemble des données de sorties, valeurs calculées, pourcentages de variation dans la matrice et figures obtenus pour les cultures est présenté, pour chaque scénario lié à un itinéraire de fertilisation et une teneur en cadmium testée dans l'engrais minéral phosphaté, en annexes 3 et 4.

L'influence des caractéristiques des sols sur le transfert du cadmium du sol vers la plante a été analysée. De façon complémentaire à l'analyse des résultats liés aux sols, il est constaté que les sols aux pH acides favorisent le transfert du cadmium vers les plantes, en présence d'une teneur en cadmium dans l'engrais phosphaté supérieure à 40 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹. Ils sont ainsi considérés comme des « sols à risque » au regard des cultures et donc de l'exposition humaine. Ce phénomène a précédemment été décrit dans la littérature (Tremel-Schaub A. et Feix I., 2005) (cf section 2.7.2.8).

2.9.5 Etude de l'évolution du cadmium lixivié pour les différents itinéraires de fertilisation en fonction des apports d'engrais minéraux phosphatés et de leurs teneurs en cadmium

L'étude de l'évolution du cadmium lixivié en fonction des apports en cadmium *via* l'emploi d'engrais minéraux phosphatés est d'intérêt afin de préjuger de la contamination en cadmium dans l'environnement, même si ce point d'étude des lixiviats n'entre pas strictement dans le cadre de la saisine.

A noter que ce qui est désigné ici par l'étude de la part de cadmium lixivié correspond, compte tenu du modèle, au transfert du cadmium par l'eau seulement dans les vingt premiers centimètres du sol.

Dans le cas de la modalité monoculture de blé avec apport annuel d'engrais minéral phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹, il est observé une augmentation des quantités lixiviées pour les trois plus fortes concentrations en cadmium étudiées dans les engrais (90, 60 et 40 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹). Seule la concentration la plus faible testée dans l'engrais (20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹) permet de maintenir à leur niveau actuel les quantités de cadmium exportées vers les eaux par lixiviation (figure 21). Pour cette modalité, il est vraisemblable que les apports d'engrais phosphatés sont tels que les quantités de cadmium disponibles dans les sols restent élevées même en cas de forte réduction des concentrations en cadmium dans les engrais. Pour la monoculture de blé, sans impasse, la réduction significative des quantités de cadmium lixivié passe donc vraisemblablement par une réduction des apports d'engrais.

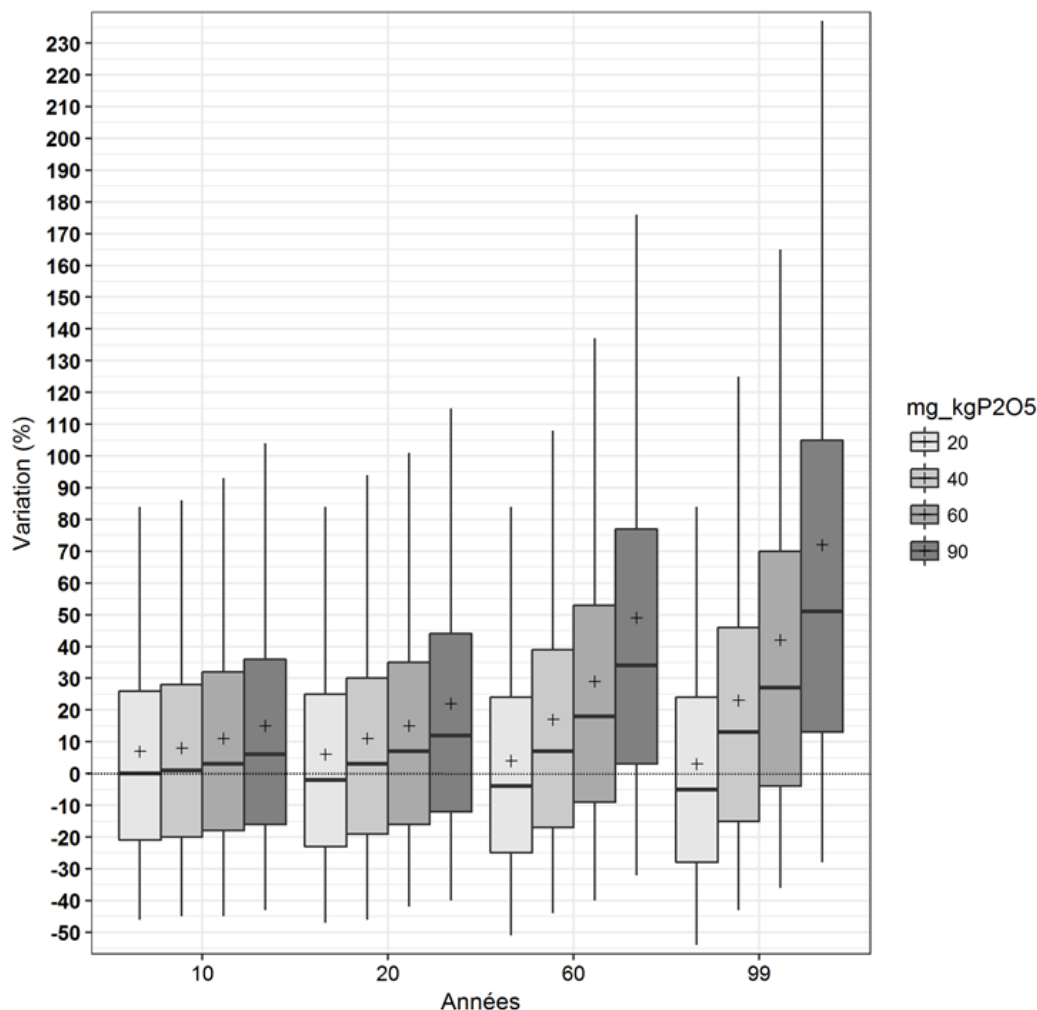


Figure 21. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, du transfert du cadmium vers l'eau lixiviée en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 80 kg P₂O₅.ha⁻¹an⁻¹ et des teneurs en cadmium constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd.kgP₂O₅⁻¹)

La figure 22 correspond au scénario monoculture de blé, avec un apport d'engrais phosphatés de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec deux années d'impasse. Il est constaté au cours du temps une augmentation de la quantité de cadmium lixivié, lorsque la concentration en cadmium dans l'engrais est égale à 60 ou 90 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹. Si cette concentration en cadmium est plus faible (égale à 40 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹), le modèle montre que la quantité de Cd lixivié est sensiblement maintenue à son niveau actuel, puis, pour la concentration minimale de 20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹, une diminution sensible des quantités modélisées de cadmium lixivié est observée.

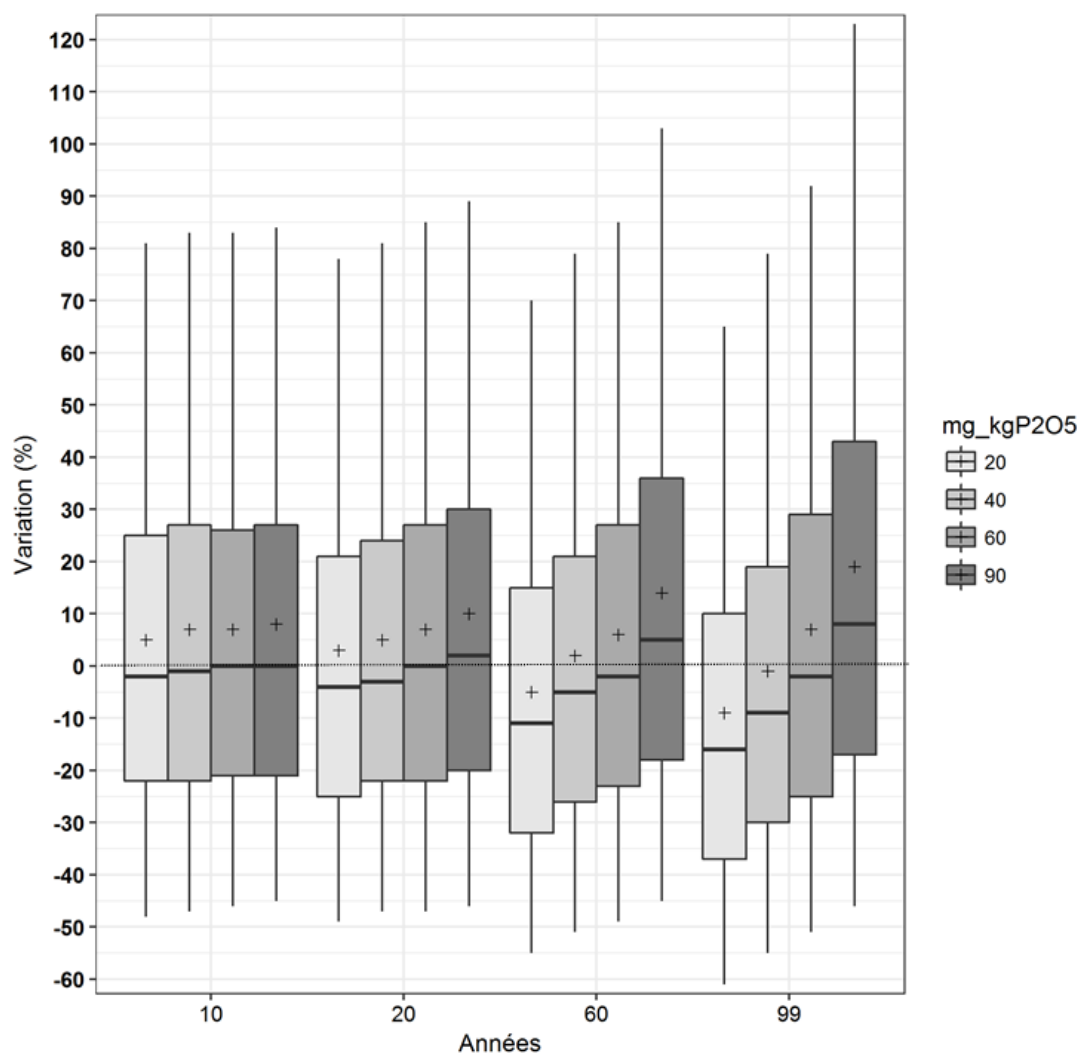


Figure 22. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, du transfert du cadmium vers l'eau lixiviée en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 100 kg.ha⁻¹.an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et des teneurs en cadmium constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

Des résultats similaires sont obtenus avec deux des autres modalités retenues (rotation pomme de terre / blé / blé avec apport de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et deux ans d'impasse ; rotation pomme de terre / blé / blé avec apport de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ tous les ans) : il est observé également une diminution des quantités lixiviées, mais celles-ci se produisent dès que la teneur en cadmium des engrais phosphatés est égale ou inférieure à 40 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹ (figures 23 et 24).

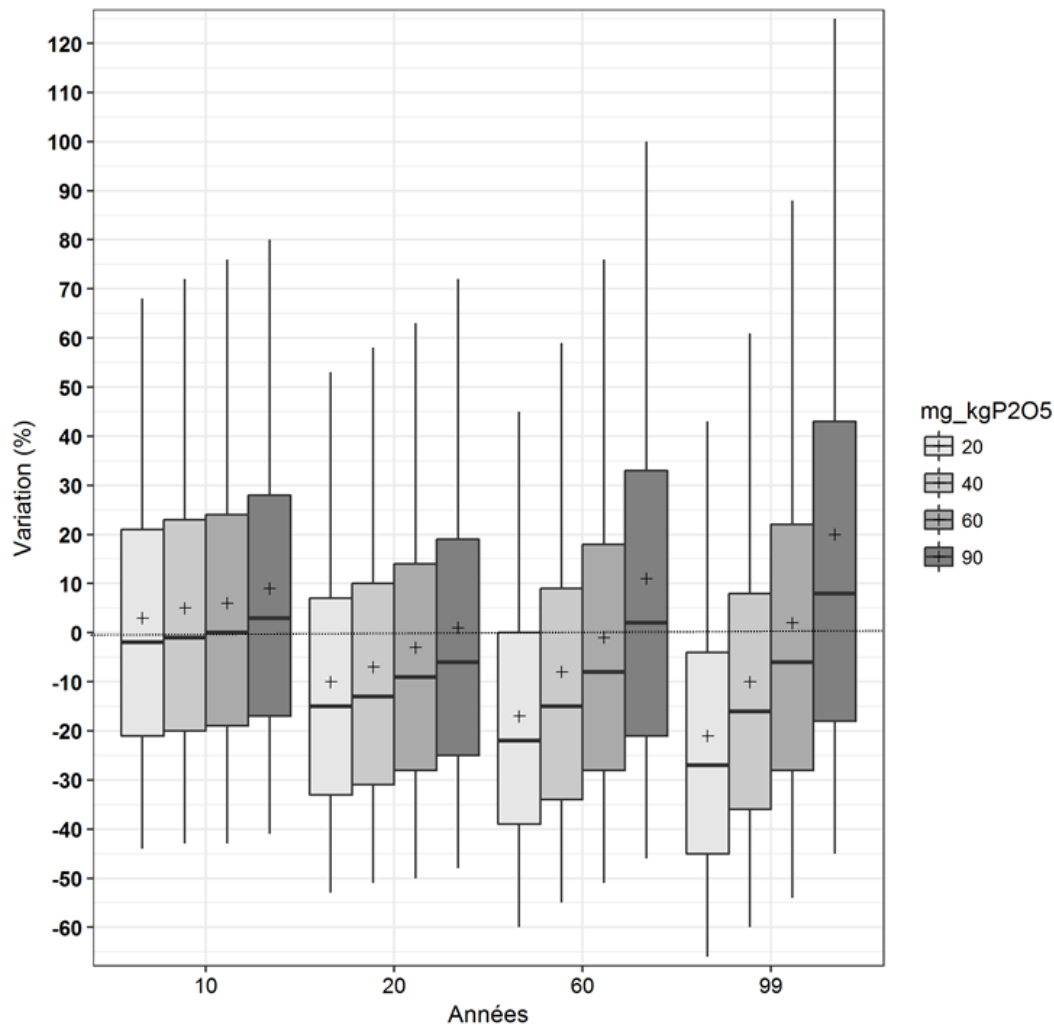


Figure 23. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, du transfert du cadmium vers l'eau lixiviée en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation en rotation de 180 kg.ha⁻¹an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et des teneurs en cadmium constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

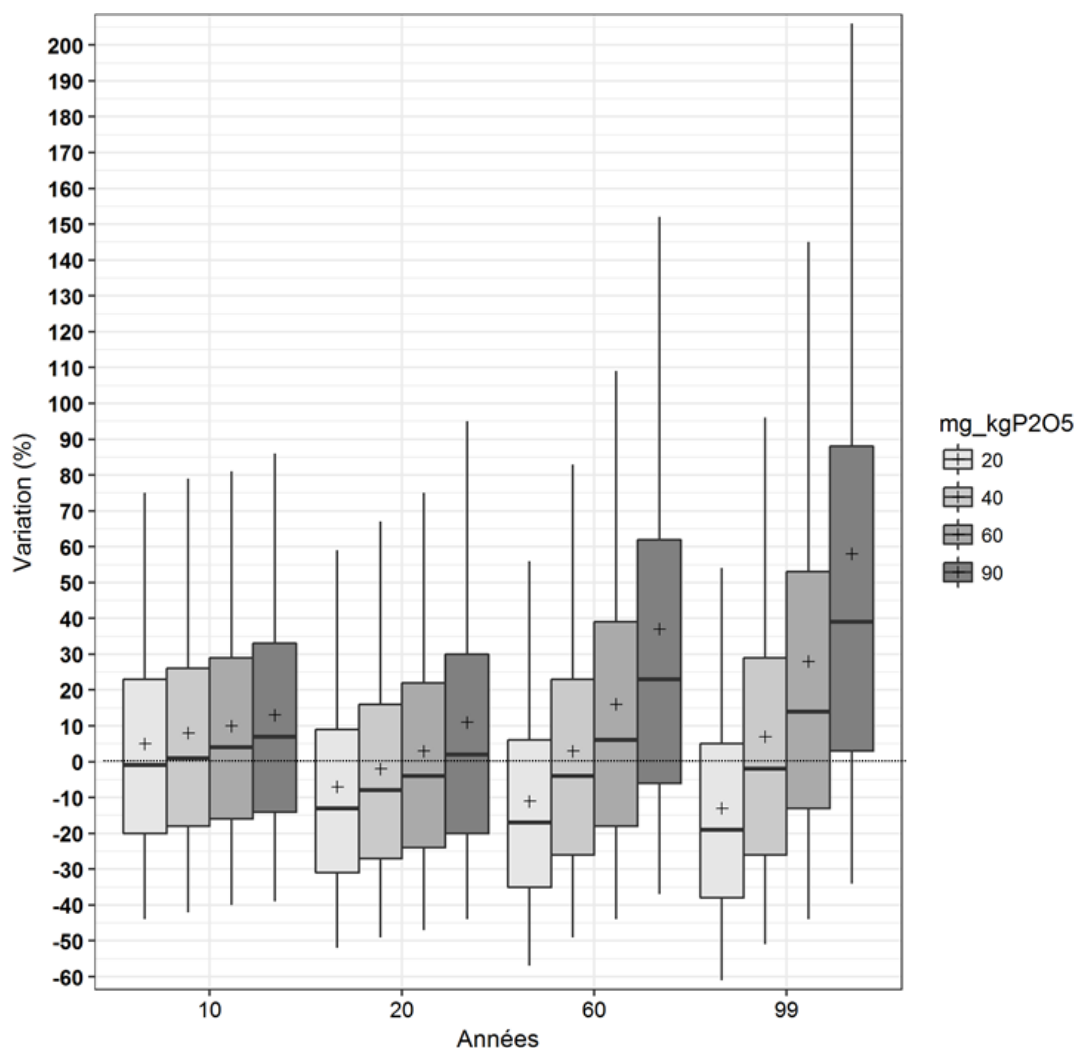


Figure 24. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation, sur la base des distributions (P05, P25, P50, P75, P95) et de la moyenne, du transfert du cadmium vers l'eau lixiviée en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation en rotation de 100 kg.ha⁻¹an⁻¹ et des teneurs en cadmium constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

Les simulations testées avec des seuils en cadmium dégressifs au cours du temps montrent des résultats similaires pour les concentrations en cadmium modélisées avec celles observées en présence de scénarios avec des seuils en cadmium dans l'engrais constants le long de la modélisation à 20 mg Cd.kg⁻¹ P₂O₅, que ce soit en présence de scénarios monoculture blé ou en rotation quelle que soit la dose d'apport en phosphore apportée (annexes 3 et 4). Le cadmium est un élément persistant dans les sols où les effets d'une action à la source sur le transfert vers les eaux ne peuvent s'observer que sur le long terme. Cela s'observe dans les résultats de modélisation obtenus au bout de 60 et 99 ans de temps de projection par comparaison avec ceux à 10 et 20 ans de projection.

L'ensemble des données de sorties, valeurs calculées, pourcentages de variation dans la matrice et graphes obtenus pour la lixiviation est présenté pour chaque scénario lié à un itinéraire de fertilisation et une teneur en cadmium testée dans l'engrais minéral phosphaté en annexes 3 et 4.

Les formes du cadmium susceptibles d'être exportées par lixiviation correspondent aux espèces solubles (cation cadmium : Cd²⁺) ou aux formes de cadmium très faiblement fixées sur le complexe argilo-humique et susceptible de transférer dans la solution du sol. Il s'agit ici des formes immédiatement

disponibles qui sont aussi celles qui peuvent être assimilées par les végétaux en culture (formes phytodisponibles). Réduire les concentrations réglementaires en cadmium dans les engrais phosphatés (et *a fortiori* dans l'ensemble des matières fertilisantes d'origine tant minérale qu'organique) contribuerait donc à réduire simultanément les transferts vers la plante et vers les eaux continentales. Même si ce dernier point dépasse le contexte strict de la saisine, il est nécessaire de pointer le fait que ces transferts vers les eaux souterraines et superficielles contribuent à la contamination diffuse et généralisée de l'environnement et que ceci participe à un véritable cycle biogéochimique du cadmium et des autres polluants métalliques ; cycle qu'il convient de limiter dans toute la mesure du possible en raison de l'impact environnement-santé généré. Par ailleurs, ces eaux peuvent par la suite être utilisées pour l'irrigation des cultures.

2.9.6 Etude de l'évolution modélisée de l'exposition du consommateur suite à une action à la source sur les teneurs en cadmium des engrais minéraux phosphatés apportés au sol

Les résultats modélisés préalablement pour les cultures blé (grain) et pomme de terre permettent d'extraire la distribution et la moyenne des pourcentages de variation obtenus pour la matrice culture, en fonction du temps de projection par rapport à la première année d'apport de référence, dépendant de l'itinéraire de fertilisation (monoculture blé et rotation pomme de terre-blé-blé) et des teneurs en cadmium testées dans l'engrais minéral phosphaté constantes (90, 60, 40 et 20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹) ou dégressives.

Pour l'étude de l'évolution modélisée de l'exposition du consommateur suite à une action à la source sur les teneurs en cadmium des engrais minéraux phosphatés apportés au sol, le modèle décrit en section 2.8.3 a été utilisé. Ont été retenus les plus forts pourcentages moyens de réduction de concentration en cadmium de la plante (blé et pomme de terre) identifiés préalablement à l'issue de certaines simulations. Ces réductions ont été impactées sur la concentration des aliments tels que consommés, dans le but d'estimer l'impact le plus fort sur l'exposition totale du consommateur au cadmium suite à une action à la source sur les teneurs en cadmium des engrais minéraux phosphatés apportés au sol. Les pourcentages de variation moyens en cadmium obtenus au cours des simulations pour le blé (grain) et la pomme de terre par rapport à la première année d'apport de référence sont reportés pour chaque scénario testé dans les tableaux en annexe 5.

Les scénarios retenus pour cette étude sont ainsi les suivants :

- Situation initiale (T0) : correspond aux expositions actuelles, présentées dans l'EAT2 (Anses, 2011a), avec la nouvelle VTR établie dans cette saisine (0,35 µg Cd.kg p.c⁻¹.j⁻¹) (cf rapport de la question 1 de la saisine). Les contaminations utilisées pour les calculer sont donc celles de l'EAT2 (non corrigées).
- Quatre scénarios parmi ceux testés initialement dans le modèle :
 - o Scénario 8 : dans le cas d'un itinéraire monoculture blé, le scénario lié à apport d'engrais minéral phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec deux ans d'impasse et une concentration en cadmium de 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ qui présente la moyenne de pourcentage de réduction la plus élevée dans le blé (grain) au bout de 10 ans (2%), 20 ans (4%), 60 ans (11%) et 99 ans (16%) de projection au cours de la simulation.
 - o Scénario 16 : dans le cas d'un itinéraire en rotation pomme de terre-blé-blé, le scénario lié à apport d'engrais minéral phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec deux ans d'impasse et une concentration en cadmium de 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ qui présente la moyenne de pourcentage de réduction la plus élevée dans le blé (grain) au bout de 11 ans (2%), 20 ans (5%), 60 ans (12%) et 99 ans (18%), et dans la pomme de terre au bout de 10 ans (2%), 22 ans (4%), 61 ans (10%) et 97 ans (14%) de projection au cours de la simulation.

- Scénario 18 : dans le cas d'un itinéraire monoculture blé, le scénario réaliste testé lié à un apport d'engrais minéral phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec deux ans d'impasse et des seuils en cadmium dégressifs au cours du temps de projection (60 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport puis une réduction de ce seuil à 40 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans et à terme à 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹) qui présente la moyenne de pourcentage de réduction la plus élevée dans le blé (grain) au bout de 10 ans (1%), 20 ans (3%), 60 ans (10%) et 99 ans (15%) de projection au cours de la simulation.
- Scénario 20 : dans le cas d'un itinéraire et rotation pomme de terre-blé-blé, le scénario réaliste testé lié à un apport d'engrais minéral phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec deux ans d'impasse et des seuils en cadmium dégressifs au cours du temps de projection qui présente la moyenne de pourcentage de réduction la plus élevée dans le blé (grain) au bout de 11 ans (1%), 20 ans (2%), 60 ans (11%) et 99 ans (16%), et dans la pomme de terre au bout de 10 ans (1%), 22 ans (3%), 61 ans (9%) et 97 ans (13%) de projection au cours de la simulation.
- Deux scénarios parmi ceux testés initialement avec le modèle, comme autres scénarios de référence relatifs à la situation actuelle avec le seuil réglementaire en cadmium de 90 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ dans l'engrais minéral phosphaté :
 - Scénario 1 : dans le cas d'un itinéraire monoculture blé, le scénario lié à un apport d'engrais minéral phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et une concentration en cadmium de 90 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ qui présente la moyenne de pourcentage d'augmentation la plus élevée observée dans le blé (grain) au bout de 10 ans (7%), 20 ans (15%), 60 ans (42%) et 99 ans (64%) de projection au cours de la simulation.
 - Scénario 9 : dans le cas d'un itinéraire et rotation pomme de terre-blé-blé, le scénario lié à un apport d'engrais minéral phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et une concentration en cadmium de 90 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ qui présente la moyenne de pourcentage d'augmentation la plus élevée observée dans le blé (grain) au bout de 11 ans (8%), 20 ans (15%), 60 ans (44%) et 99 ans (67%), et dans la pomme de terre au bout de 10 ans (6%), 22 ans (14%), 61 ans (34%) et 97 ans (48%) de projection au cours de la simulation.

Les résultats des expositions calculées en prenant en compte ces scénarios sont présentés ci-après.

• Situation initiale

Les résultats concernant la situation initiale sont présentés dans le tableau 22. Les résultats étant très proches d'une hypothèse de traitement de la censure à l'autre (LB, MB, UB), il a été décidé de ne présenter que la situation en LB et en UB.

Chez les adultes, il est noté 0,67% de dépassement de la VTR en LB et 1,1% en UB. Chez les enfants, il est constaté 15,4% de dépassement de la VTR en LB et 18,5% en UB.

Tableau 22. Description de l'exposition au cadmium de la population – situation initiale

	Exposition moyenne (µg.kg pc ⁻¹ .j ⁻¹)		Exposition au P95 (µg.kg pc ⁻¹ .j ⁻¹)		% dépassement de la VTR [IC _{95%}]	
	LB	UB	LB	UB	LB	UB
Adultes	0,15	0,16	0,26	0,27	0,67 [0,30 ; 1,04]	1,1 [0,62 ; 1,56]
Enfants	0,24	0,25	0,44	0,46	15,4 [13,6 ; 17,3]	18,5 [16,5 ; 20,5]

- **Scénarios 8, 16, 18, 20, au regard des scénarios de référence 1 et 9 et de la situation initiale**

Les résultats d'exposition des scénarios 8, 16, 18, 20 au regard des scénarios 1 et 9 et de la situation initiale sont présentés ci-après dans le tableau 23 pour les adultes et le tableau 24 pour les enfants.

Tableau 23. Description de l'exposition au cadmium de la population adulte – scénarios 8, 16, 18, 20, 1 et 9, situation initiale

Scenario	Pas de temps	Exposition moyenne ($\mu\text{g.kg pc}^{-1}.\text{j}^{-1}$)		Exposition au P95 ($\mu\text{g.kg pc}^{-1}.\text{j}^{-1}$)		% dépassement de la VTR [IC _{95%}]	
		LB	UB	LB	UB	LB	UB
Sit. initiale	T0	0,15	0,16	0,26	0,27	0,67 [0,30 ; 1,04]	1,1 [0,62 ; 1,56]
Sc 1	T10	0,16	0,17	0,27	0,28	0,79 [0,39 ; 1,18]	1,12 [0,65 ; 1,60]
	T20	0,16	0,17	0,27	0,29	0,97 [0,53 ; 1,41]	1,18 [0,69 ; 1,66]
	T60	0,17	0,19	0,29	0,31	1,31 [0,80 ; 1,82]	2,12 [1,47 ; 2,77]
	T99	0,18	0,20	0,30	0,33	1,69 [1,11 ; 2,27]*	3,29 [2,49 ; 4,10]*
Sc 9	T10	0,16	0,17	0,27	0,28	0,91 [0,48 ; 1,33]	1,12 [0,65 ; 1,60]
	T20	0,16	0,17	0,28	0,29	1,11 [0,64 ; 1,58]	1,27 [0,77 ; 1,78]
	T60	0,18	0,19	0,30	0,32	1,64 [1,07 ; 2,21]*	2,63 [1,91 ; 3,35]*.£
	T99	0,19	0,21	0,32	0,34	2,80 [2,06 ; 3,54]*	4,42 [3,49 ; 5,34]*.£
Sc 8	T10	0,15	0,16	0,26	0,27	0,67 [0,30 ; 1,04]	1,02 [0,57 ; 1,47]
	T20	0,15	0,16	0,26	0,27	0,65 [0,29 ; 1,01]	0,76 [0,37 ; 1,15]
	T60	0,15	0,16	0,26	0,26	0,65 [0,29 ; 1,01]	0,69 [0,32 ; 1,07] [§]
	T99	0,15	0,16	0,25	0,26	0,61 [0,26 ; 0,96] [§]	0,65 [0,29 ; 1,01] [§]
Sc 16	T10	0,15	0,16	0,26	0,27	0,65 [0,29 ; 1,01]	0,90 [0,47 ; 1,32]
	T20	0,15	0,16	0,26	0,27	0,65 [0,29 ; 1,01]	0,74 [0,35 ; 1,12]
	T60	0,15	0,16	0,25	0,26	0,65 [0,29 ; 1,01] [§]	0,65 [0,29 ; 1,01] [§]
	T99	0,14	0,15	0,25	0,25	0,61 [0,26 ; 0,96] [§]	0,65 [0,29 ; 1,01] [§]
Sc 18	T10	0,15	0,16	0,26	0,27	0,67 [0,30 ; 1,04]	1,02 [0,57 ; 1,47]
	T20	0,15	0,16	0,26	0,27	0,65 [0,29 ; 1,01]	0,76 [0,37 ; 1,15]
	T60	0,15	0,16	0,26	0,26	0,65 [0,29 ; 1,01]	0,69 [0,32 ; 1,07] [§]
	T99	0,15	0,16	0,25	0,26	0,61 [0,26 ; 0,96] [§]	0,65 [0,29 ; 1,01] [§]
Sc 20	T10	0,15	0,16	0,26	0,27	0,67 [0,30 ; 1,04]	1,02 [0,57 ; 1,47]
	T20	0,15	0,16	0,26	0,27	0,65 [0,29 ; 1,01]	0,90 [0,47 ; 1,32]
	T60	0,15	0,16	0,25	0,26	0,65 [0,29 ; 1,01] [§]	0,65 [0,29 ; 1,01] [§]
	T99	0,15	0,15	0,25	0,25	0,61 [0,26 ; 0,96] [§]	0,65 [0,29 ; 1,01] [§]

* : différence significative par rapport à la situation initiale (T0)

£ : différence significative par rapport au pas de temps précédent, au sein d'un même scénario

§ : différence significative par rapport au scénario de référence (S1 ou S9), pour le même pas de temps

Tableau 24. Description de l'exposition au cadmium de la population enfant – scénarios 8, 16, 18, 20, 1 et 9, situation initiale

Scenario	Pas de temps	Exposition moyenne ($\mu\text{g.kg pc}^{-1}.\text{j}^{-1}$)		Exposition au P95 ($\mu\text{g.kg pc}^{-1}.\text{j}^{-1}$)		% dépassement de la VTR [IC _{95%}]	
		LB	UB	LB	UB	LB	UB
Sit. initiale	T0	0,24	0,25	0,44	0,46	15,4 [13,6 ; 17,3]	18,5 [16,5 ; 20,5]
Sc 1	T10	0,24	0,26	0,45	0,47	16,0 [14,1 ; 17,9]	20,2 [18,1 ; 22,2]
	T20	0,25	0,26	0,46	0,48	17,2 [15,2 ; 19,1]	22,2 [20,0 ; 24,3]
	T60	0,27	0,28	0,48	0,51	22,9 [20,7 ; 25,0]*, £	26,5 [24,3 ; 28,8]*
	T99	0,28	0,30	0,51	0,54	25,4 [23,2 ; 27,7]*	32,3 [29,9 ; 34,7]*, £
Sc 9	T10	0,25	0,26	0,45	0,48	16,3 [14,4 ; 18,2]	20,8 [18,7 ; 22,9]
	T20	0,25	0,27	0,47	0,49	18,6 [16,6 ; 20,6]	23,4 [21,2 ; 25,5]*
	T60	0,28	0,30	0,51	0,54	25,8 [23,5 ; 28,0]*, £	30,3 [28,0 ; 32,7]*, £
	T99	0,30	0,32	0,54	0,57	29,7 [27,4 ; 32,1]*	36,8 [34,3 ; 39,3]*, £
Sc 8	T10	0,24	0,25	0,44	0,46	15,0 [13,2 ; 16,9]	18,0 [16,0 ; 20,0]
	T20	0,24	0,25	0,44	0,46	14,7 [12,9 ; 16,5]	17,2 [15,2 ; 19,1] §
	T60	0,23	0,24	0,43	0,45	13,9 [12,2 ; 15,7] §	15,9 [14,0 ; 17,7] §
	T99	0,23	0,24	0,43	0,44	12,8 [11,1 ; 14,6] §	15,0 [13,1 ; 16,8] §
Sc 16	T10	0,24	0,25	0,44	0,46	14,7 [12,9 ; 16,6]	17,5 [15,6 ; 19,5]
	T20	0,24	0,25	0,43	0,45	14,1 [12,3 ; 15,9] §	16,6 [14,6 ; 18,5] §
	T60	0,23	0,24	0,43	0,44	13,2 [11,4 ; 14,9] §	14,9 [13,0 ; 16,7] §
	T99	0,22	0,23	0,42	0,43	12,1 [10,5 ; 13,8] §	13,4 [11,6 ; 15,1]*, §
Sc 18	T10	0,24	0,25	0,44	0,46	15,1 [13,3 ; 17,0]	18,3 [16,3 ; 20,3]
	T20	0,24	0,25	0,44	0,46	14,8 [13,0 ; 16,6]	17,3 [15,3 ; 19,2] §
	T60	0,23	0,24	0,43	0,45	14,1 [12,3 ; 15,9] §	15,9 [14,0 ; 17,8] §
	T99	0,23	0,24	0,43	0,44	12,9 [11,2 ; 14,7] §	15,2 [13,4 ; 17,1] §
Sc 20	T10	0,24	0,25	0,44	0,46	15,1 [13,2 ; 16,9]	18,2 [16,2 ; 20,2]
	T20	0,24	0,25	0,44	0,46	14,6 [12,8 ; 16,4] §	17,3 [15,4 ; 19,3] §
	T60	0,23	0,24	0,43	0,44	13,3 [11,6 ; 15,1] §	15,4 [13,5 ; 17,2] §
	T99	0,23	0,23	0,42	0,43	12,4 [10,7 ; 14,1] §	14,1 [12,3 ; 15,9]*, §

* : différence significative par rapport à la situation initiale

£ : différence significative par rapport au pas de temps précédent, au sein d'un même scénario

§ : différence significative par rapport au scénario de référence (S1 ou S9), pour le même pas de temps

Pour les scénarios 8, 16, 18 et 20 (relatifs à une action de diminution des teneurs en cadmium dans les engrais phosphatés jusqu'à 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ de façon constante ou dégressive dans la simulation), bien que réduits par rapport à la situation initiale, les pourcentages de dépassements de VTR restent significativement supérieurs à zéro chez les adultes comme chez les enfants, et ce quel que soit le scénario considéré. Ils demeurent supérieurs à 12% en LB comme en UB chez les enfants, même après 99 ans pour tous ces scénarios.

Seuls les scénarios 16 et 20 montrent une réduction significative du pourcentage de dépassement de la VTR chez les enfants en UB, à T99. En LB et pour les pas de temps antérieurs, cette réduction n'est jamais significative, pas plus que chez les adultes, quels que soient le pas de temps et l'hypothèse de traitement de la censure.

Concernant les scénarios de référence 1 et 9 (relatifs à l'emploi d'engrais phosphatés avec le seuil en cadmium actuel réglementaire de 90 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹), le pourcentage de dépassement de la VTR est significativement augmenté par rapport à la situation initiale (T0). Chez les adultes, en LB comme en UB, l'augmentation est significative au bout de 99 ans pour le scénario 1 et dès 60 ans de projection pour le scénario 9. Chez les enfants, l'augmentation est significative au bout de 60 ans pour le scénario 1 et dès 20 ans de projection pour le scénario 9 en UB (T60 en LB).

La comparaison de chaque scénario 8, 16, 18 et 20 (relatifs à une action de diminution des teneurs en cadmium dans les engrais phosphatés jusqu'à 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ de façon constante ou dégressive dans la simulation) aux scénarios de référence 1 et 9 (relatifs à l'emploi d'engrais phosphatés avec le seuil en cadmium actuel réglementaire de 90 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹), pour chaque pas de temps, montre logiquement des améliorations significatives à la suite d'une action à la source. Dans le cas de scénarios relatifs à des itinéraires de fertilisation en monoculture blé, chez les adultes, les scénarios 8 et 18 présentent un pourcentage de dépassement de la VTR significativement plus bas au bout de 60 ans (en LB) et 99 ans de projection (LB et UB) que dans le scénario 1 de référence. De même, dans le cas de scénarios relatifs à des itinéraires de fertilisation en rotation pomme de terre-blé-blé, chez les adultes, les scénarios 16 et 20 présentent un pourcentage de dépassement de la VTR significativement plus faible au bout de 60 et 99 ans de projection (LB et UB) que dans le scénario 9 de référence. Chez les enfants, pour la comparaison de ces mêmes scénarios, les scénarios 8 et 18 présentent un pourcentage de dépassement de la VTR significativement plus faible que dans le scénario 1 de référence dès 20 ans de projection en LB et 60 ans de projection en LB et UB. De même, les scénarios 16 et 20 présentent un pourcentage de dépassement de la VTR significativement plus faible que dans le scénario 9 de référence à partir de 20 ans de projection (en LB et UB).

Les figures 25 à 28 présentent, selon l'hypothèse de traitement de censure (LB, UB), les pourcentages de dépassement de la VTR (0,35 µg Cd.kg p.c⁻¹.j⁻¹) chez les consommateurs adultes et enfants au cours des simulations pour la situation initiale et les scénarios 1, 9 (scénarios de référence avec le seuil actuel réglementaire de 90 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ testé dans l'engrais minéral phosphaté), comparés aux scénarios 8, 16, 18 et 20 (scénarios relatifs à une action de diminution des teneurs en cadmium dans les engrais phosphatés jusqu'à 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ de façon constante ou dégressive dans la simulation).

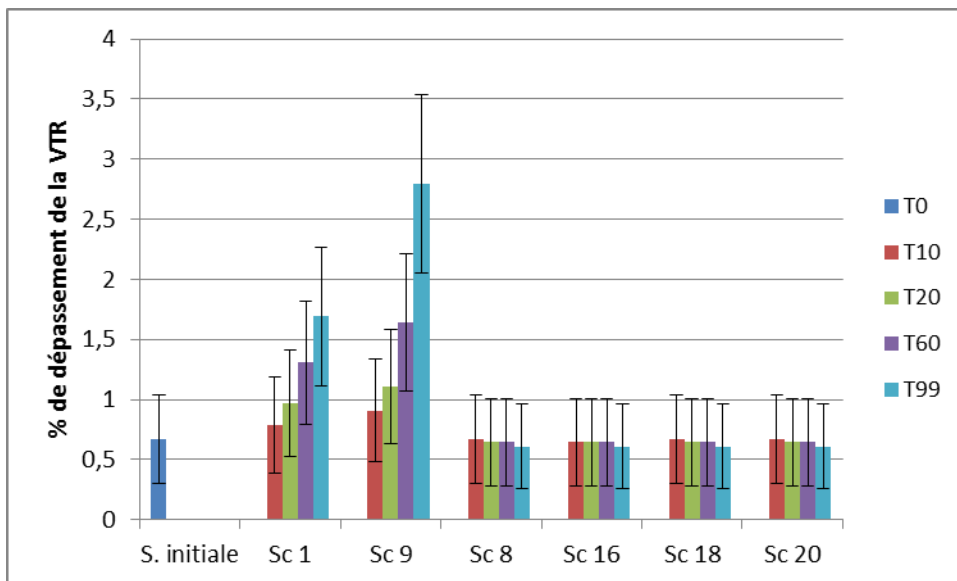


Figure 25. Pourcentage de dépassement de la VTR de 0,35 µg Cd.kg p.c⁻¹.j⁻¹ et intervalle de confiance à 95% (IC_{95%}) dans les différents scénarios, chez les adultes, en LB

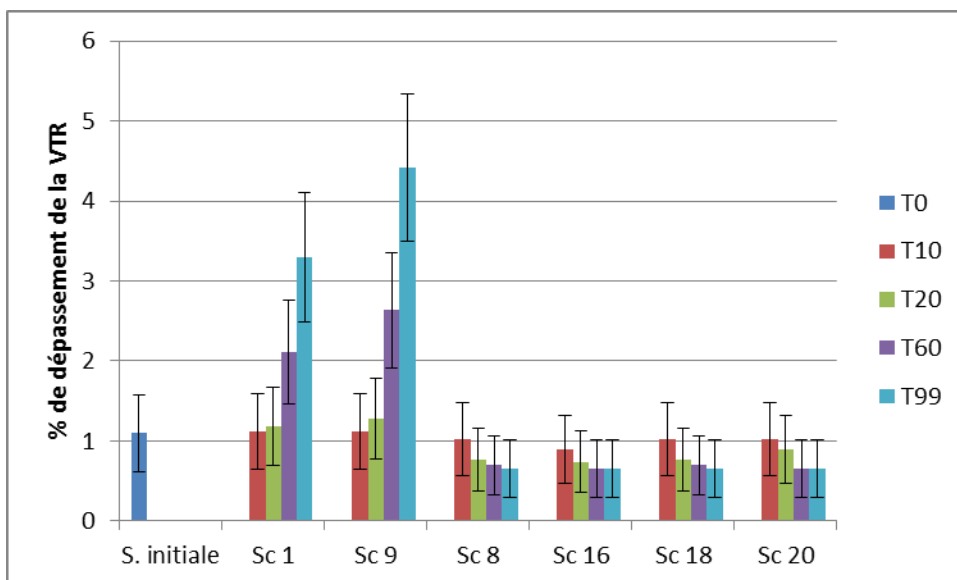


Figure 26. Pourcentage de dépassement de la VTR de 0,35 µg Cd.kg p.c⁻¹.j⁻¹ et intervalle de confiance à 95% (IC_{95%}) dans les différents scénarios, chez les adultes, en UB

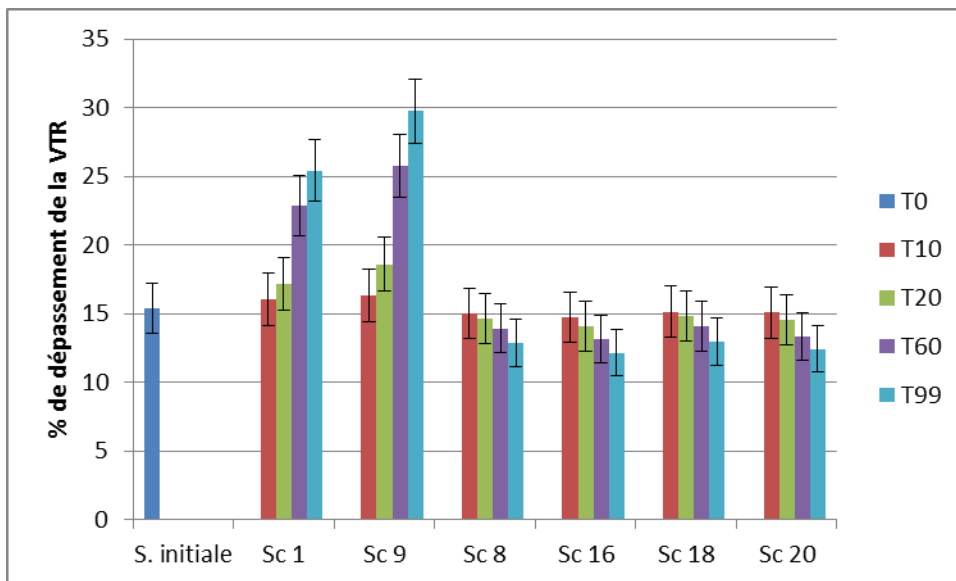


Figure 27. Pourcentage de dépassement de la VTR de $0,35 \mu\text{g Cd.kg p.c}^{-1}.\text{j}^{-1}$ et intervalle de confiance à 95% ($\text{IC}_{95\%}$) dans les différents scénarios, chez les enfants, en LB

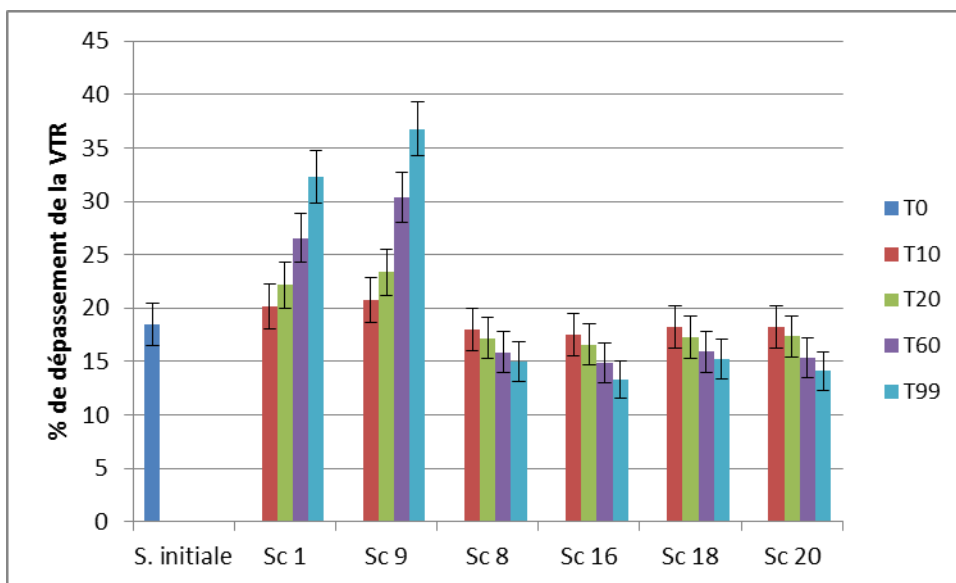


Figure 28. Pourcentage de dépassement de la VTR de $0,35 \mu\text{g Cd.kg p.c}^{-1}.\text{j}^{-1}$ et intervalle de confiance à 95% ($\text{IC}_{95\%}$) dans les différents scénarios, chez les enfants, en UB

Ces résultats mettent en évidence que, si aucune action n'est portée à ce jour sur la réduction du cadmium dans les engrais phosphatés (scénarios 1 et 9), une augmentation significative du pourcentage de dépassement de la VTR chez les adultes comme chez les enfants, après 60 ou 99 ans de projection sera observé. Dans le scénario 9, ce pourcentage de dépassement chez les enfants serait doublé à partir de 99 ans de projection, avec un tiers ou plus des enfants pour lesquels le risque lié à l'exposition alimentaire au cadmium ne pourrait être exclu.

Les résultats montrent également qu'à la suite d'une action de réduction de la concentration en cadmium dans les engrais phosphatés, il y a un impact relativement faible sur le niveau d'exposition chronique (moyen et P95) du consommateur adulte et enfant par rapport aux

situations de référence (situation initiale, scénarios 1 et 9). Cependant, il est observé au terme de la simulation une réduction significative du pourcentage de dépassement de la VTR dans les scénarios 8, 16, 18, 20 vis-à-vis des situations de référence (scénarios 1 et 9).

Il est souligné que la diminution de contamination considérée dans le modèle à la suite d'une réduction des teneurs en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés porte sur deux cultures : blé (grain) et pomme de terre, celle-ci étant répercutée sur les aliments à base de blé et pomme de terre. Sur cette base, cette modélisation permet de montrer une tendance à la diminution de la contamination des productions végétales impactant *in fine* l'exposition du consommateur en réduisant de façon significative (par rapport aux scénarios 1 et 9) dans le temps de simulation le pourcentage de dépassement de la VTR. Néanmoins, les engrais minéraux phosphatés sont appliqués sur toutes les cultures et pas uniquement sur la pomme de terre et le blé modélisés ici. Il est donc vraisemblable que les effets observés à la suite d'une action de réduction de la teneur en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés se répercuteront favorablement sur l'ensemble des productions végétales (consommation humaine et alimentation animale) exposées à ces intrants et par voie de conséquence sur les aliments associés présents dans l'assiette du consommateur. Ainsi, une action de réduction des teneurs en cadmium dans les intrants agricoles pourra aller dans le sens d'une voie de progrès par la diminution de la contamination des productions végétales, les sols étant épurés au fil du temps, puis de l'exposition du consommateur.

2.9.7 Etude de flux de cadmium apportés par les matières fertilisantes

Le transfert de cadmium issu des apports d'engrais phosphatés minéraux des sols vers les cultures et les eaux de lixiviation doit être comparé aux flux entrants dans les sols par d'autres matières fertilisantes (exemples : boues, fumiers, digestats) afin de discuter de façon plus complète les phénomènes d'accumulation du cadmium dans les divers compartiments et de dériver *in fine* les niveaux limites et appropriés en cadmium élargis aux matières fertilisantes.

2.9.7.1 Comparaisons des flux de cadmium apportés par les matières fertilisantes

Cette section présente les comparaisons des flux de cadmium apportés au sol par les fertilisants phosphatés et les matières organiques. Les flux de cadmium (exprimés en $\text{g}\cdot\text{ha}^{-1}$ et par an) dépendent des quantités apportées aux sols et des concentrations observées dans les fertilisants.

Dans un premier temps, les itinéraires de fertilisation relatifs à l'usage d'engrais minéraux phosphaté en monoculture blé et rotation préalablement simulés pour lesquels il a été testé différentes teneurs en cadmium dans le fertilisant phosphaté sont convertis en flux. Le tableau 25 présente la conversion des flux liés aux apports de fertilisants phosphatés résultant des scénarios d'itinéraire de fertilisation testés dans le modèle. Il est observé que la culture de la pomme de terre (végétal exigeant au regard du phosphore) peut induire un flux de $9 \text{ g Cd}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ à la suite de l'emploi d'engrais minéral phosphaté en condition de sols pauvrement pourvus en phosphore. Il est également visible que les épandages avec deux ans d'impasse induisent logiquement des flux annuels de cadmium plus faibles.

Tableau 25. Flux liés aux apports de fertilisants phosphatés résultant des scénarios d'itinéraire de fertilisation testés dans le modèle

	Numéro scénario d'itinéraire de fertilisation	Concentration Cd dans le fertilisant (mg.kg P ₂ O ₅ ⁻¹)	Quantité d'engrais épandu (kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹)	Flux de Cd amené au sol (kg.ha ⁻¹)	Flux annuel Cd (g.ha ⁻¹ .an ⁻¹)
Épandage pour une monoculture de blé	4	20 (Ph/80b/20)	80	1,60	1,60
	3	40 (Ph/80b/40)		3,20	3,20
	2	60 (Ph/80b/60)		4,80	4,80
	1	90 (Ph/80b/90)		7,20	7,20
Épandage avec deux ans d'impasse pour une monoculture de blé	8	20 (Ph/100b/20)	100	2	0,67
	7	40 (Ph/100b/40)		4	1,33
	6	60 (Ph/100b/60)		6	2
	5	90 (Ph/100b/90)		9	3
Épandage pour une rotation pomme de terre/blé/blé	12	20 (Ph/100bp/20)	100	2	2
	11	40 (Ph/100bp/40)		4	4
	10	60 (Ph/100bp/60)		6	6
	9	90 (Ph/100bp/90)		9	9
Épandage avec deux ans d'impasse pour une rotation pomme de terre/blé/blé	16	20 (Ph/180bp/20)	180	3,60	1,20
	15	40 (Ph/180bp/40)		7,20	2,40
	14	60 (Ph/180bp/60)		10,80	3,60
	13	90 (Ph/180bp/90)		16,20	5,40

Ces flux de cadmium calculés pour les engrais minéraux phosphatés sont mis au regard des flux apportés par les épandages de fertilisants d'origine organiques.

Il a été dérivé des flux en cadmium pour des fertilisants d'origine organique susceptibles d'être utilisés. Ces flux pour les fertilisants d'origine organique ont été calculés en fonction de la disponibilité des données et concernent les boues de STEP, fumiers bovins et digestats de méthanisation (tableau 26).

Les quantités épandues présentées dans le tableau 26 correspondent aux pratiques possibles. Pour les effluents d'élevage et les digestats issus de méthanisation à la ferme (pratique la plus observée en France, par opposition aux digestats de déchets et de la méthanisation territoriale) (Irstea et SOLAGRO, 2012), ces quantités ont été calculées sur la base d'un raisonnement en apport d'azote. Le seuil maximal de la directive nitrate⁴⁰ qui fixe un apport de 170 kg d'azote.ha⁻¹.an⁻¹ a été considéré. Pour les boues de STEP, le seuil maximal autorisé par la réglementation a été retenu. En effet, les quantités d'azote et la nature physique des boues (liquide, pâteuse ou solide) sont variables. Il a été choisi de partir du seuil maximal d'apport autorisé par la réglementation (3 tonnes MS.ha⁻¹.an⁻¹)⁴¹. Le résultat du calcul des quantités des fertilisants d'origine organique épandu est présenté dans le tableau 26.

⁴⁰ [Directive 91/676/CEE du Conseil, du 12 décembre 1991, concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles](#) sur EUR-Lex, Journal officiel n° L 375 du 31/12/1991 p. 0001 - 0008 (consulté le 3 mai 2018).

⁴¹ Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées

Tableau 26. Flux liés aux apports de fertilisants d'origine organique testés dans le modèle

	Concentration moyenne du Cd dans l'amendement organique (mg.kg ⁻¹ MS)	Quantité d'azote total (kg.t ⁻¹ MS)	Quantité d'amendement épanchée au seuil 170 kgN.ha ⁻¹ (t MS. ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Flux Cd au sol en un apport (g.ha ⁻¹ .an ⁻¹)
Boues de STEP (B)	1,6	Sans objet	3	4,8
Fumier de bovins (FB)	0,3	20	8,5	2,55
Digestat de méthanisation à la ferme (DMF)	0,7	68	2,5	1,75
Scénario complémentaire	Seuil réglementaire en Cd dans le digestat	Quantité d'azote total (kg.t ⁻¹ MS)	Quantité d'amendement épanchée au seuil 170 kgN.ha ⁻¹ (t MS. ha ⁻¹ .an ⁻¹)	Flux Cd au sol en un apport (g.ha ⁻¹ .an ⁻¹)
Digestat Cd max de méthanisation à la ferme (DCdMF) (a)	3	68	2,5	7,5

(d'après Plateau (2001), Chambre d'agriculture Bretagne et al. (2007), Irstea et SOLAGRO (2012), Benoît *et al.* (2014), Wolf environnement (2001))

a : les calculs proposés reprennent la concentration de cadmium proposée dans le cahier des charges pour la mise sur le marché et l'utilisation de digestats de méthanisation agricoles en tant que matières fertilisantes (arrêté du 13 juin 2017)

Les apports de cadmium aux sols *via* les épandages de fertilisants d'origine organique sont essentiellement liés à la quantité épanchée puisque les concentrations de cadmium y sont assez faibles. La comparaison des tableaux 25 et 26 montre que les flux de cadmium apportés par les engrais minéraux phosphatés (0,67 à 9 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹) et par les fertilisants d'origine organique (1,75 à 7,5 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹) sont équivalents. Ainsi, les boues, les effluents animaux ou les digestats drainent-ils un flux de cadmium comparable aux fertilisants minéraux phosphatés compris entre 1,75 à 7,5 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹. Dans le cas des fumures d'origine organique produites hors des exploitations agricoles (composts, boues de STEP...), le rapport Agreste 2011⁴² précise que 9% des apports sont concernés par cette origine alors que 80% des apports sont d'origine bovine, porcine ou aviaire.

La fertilisation phosphatée est principalement utilisée sur une diagonale sud-ouest/nord-est (Rapport Agreste, 2011) de la France et la moitié des surfaces de grandes cultures a reçu un apport phosphaté en 2011. Ces apports sont à comparer aux sols de grandes cultures (environ ¼) qui reçoivent de la fumure d'origine organique, et qui sont situés notamment dans l'ouest et le Limousin.

La réduction des apports de cadmium au sol issus des engrais minéraux phosphatés peut être réalisée en régulant les concentrations de cadmium dans les phosphates miniers. Cela est techniquement possible en choisissant des sources de phosphates naturellement pauvres en cadmium ou en mettant en œuvre des techniques de décadmiation. Cependant, pour les apports de cadmium par les matières fertilisantes d'origine organique (boues de STEP, fumiers, lisiers, purins, etc.) qui sont liées à une contamination environnementale généralisée et ubiquitaire (alimentation animale, rejets domestiques, rejets industriels, transports, retombées atmosphériques...), les quantités de cadmium apportées au sol sont conditionnées par les quantités épanchées. Des analyses régulières du cadmium dans les effluents et la limitation des

⁴²Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. 2014. Enquête pratiques culturales 2011 : Principaux résultats. Agreste Les dossiers n°21. 70pp.

quantités épandues peuvent dans ce cas permettre de limiter efficacement les apports de cadmium au sol.

2.9.7.2 Etude des flux en cadmium apportés par les matières fertilisantes

Les apports de cadmium dans le sol *via* les fertilisants d'origine organique ont été évalués grâce au modèle de bilan massique décrit plus haut. L'évaluation s'est appuyée sur les flux entrants en cadmium dérivés pour les fertilisants d'origine organique et présentés dans le tableau 26, comme données d'entrées au modèle. Les résultats découlant du bilan massique des itinéraires de fertilisation d'usage de fertilisants d'origine organique ont été comparés avec ceux préalablement modélisés correspondant aux flux entrants en cadmium liés à l'emploi d'engrais minéraux phosphatés (résultats en section 2.9.3, 2.9.4, 2.9.5 et tableau 25 correspondant de flux en section 2.9.7.1) dans le contexte d'un itinéraire en monoculture blé.

Les figures 29, 30 et 31 représentent respectivement les variations moyennes des concentrations en cadmium dans les sols, le blé (grain) et les lixiviats exprimées en fonction de la quantité de cadmium apportés chaque année *via* (i) les effluents d'élevage, (ii) les boues de STEP, (iii) les digestats de méthanisation et (iv) de quelques scénarios d'épandages sur blé d'engrais phosphatés avec une dose de 80 kg P₂O₅.ha⁻¹ (affichage des itinéraires d'emploi d'engrais phosphatés testés avec une teneur réduite en cadmium de 40 et 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹). Enfin, à titre de comparaison et informatif, les résultats liés au scénario n'impliquant aucun intrant agronomique sont ajoutés sur les graphiques.

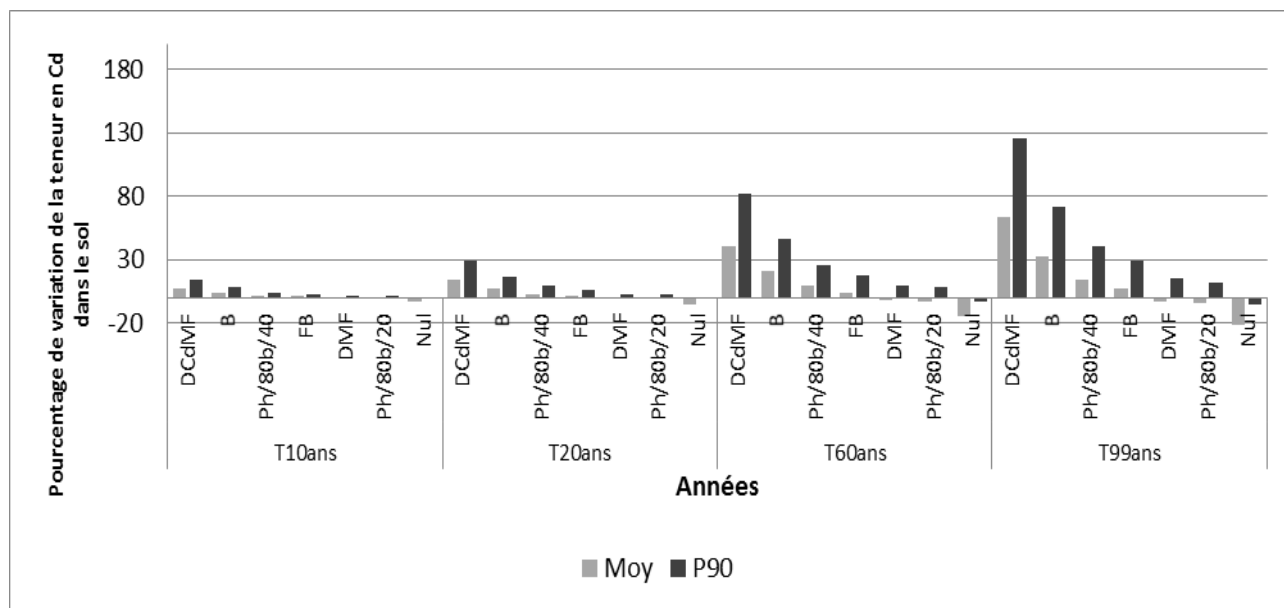


Figure 29. Variations (%) des teneurs moyennes et au décile 90 en cadmium des sols en fonction du flux d'apport des matières fertilisantes selon un itinéraire en monoculture blé

DCdMF : Digestat de méthanisation à la ferme lié à la teneur en cadmium réglementaire (3 mg.kg⁻¹MS) représentant un flux d'apport de 7,5 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

DMF : Digestat de méthanisation à la ferme lié à la teneur en cadmium moyenne observée (0,7 mg.kg⁻¹MS) représentant un flux d'apport de 1,75 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

B : Boues de STEP représentant un flux d'apport de 4,8 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

FB : Fumiers de bovins représentant un flux d'apport de 2,55 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

Ph/80b/40 : engrais minéral phosphaté lié à la teneur en cadmium de 40 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ pour une dose d'apport de 80 kg P₂O₅.ha⁻¹ pour un itinéraire en monoculture blé sur un sol pauvrement pourvu en phosphore représentant un flux d'apport de 3,20 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

Ph/80b/20 : engrais minéral phosphaté lié à la teneur en cadmium de 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ pour une dose d'apport de 80 kg P₂O₅.ha⁻¹ pour un itinéraire en monoculture blé sur un sol pauvrement pourvu en phosphore représentant un flux d'apport de 1,60 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

Nul : aucun flux d'apport en cadmium *via* les intrants agronomiques (les apports en cadmium dans ce scénario sont uniquement liés aux dépôts atmosphériques et eaux d'irrigation s'ajoutant à la présence du fond géochimique).

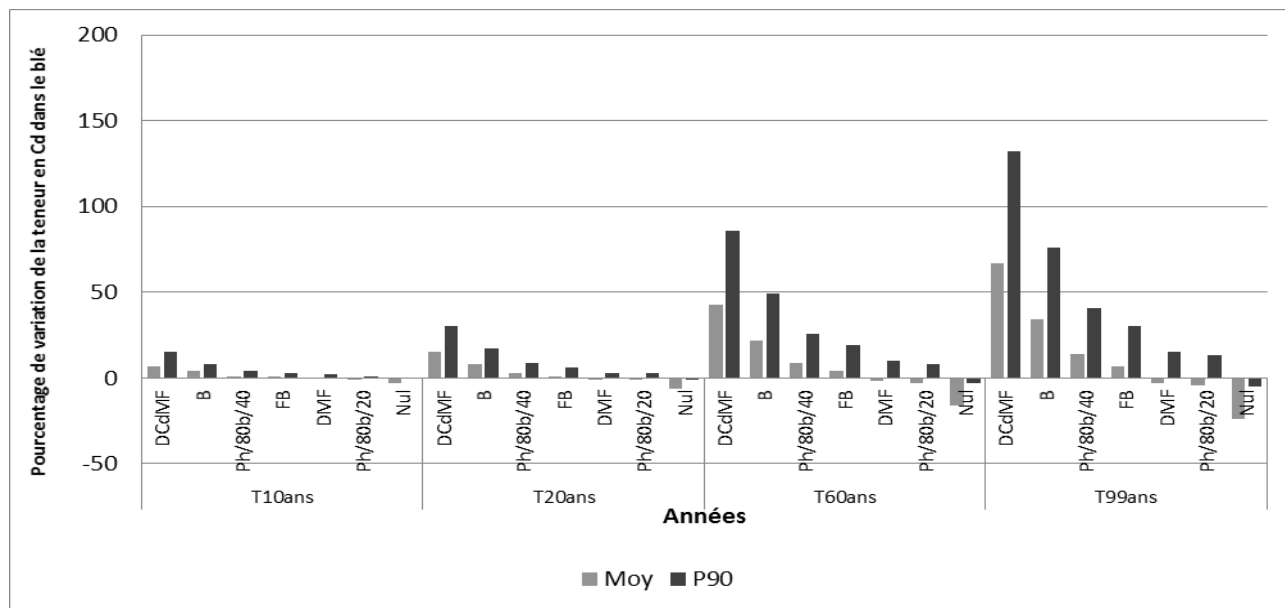


Figure 30. Variations (%) des teneurs moyennes et au décile 90 en Cd dans le grain de blé en fonction du flux d'apport des matières fertilisantes selon un itinéraire en monoculture blé

DCdMF : Digestat de méthanisation à la ferme lié à la teneur en cadmium réglementaire (3 mg.kg⁻¹MS) représentant un flux d'apport de 7,5 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

DMF : Digestat de méthanisation à la ferme lié à la teneur en cadmium moyenne observée (0,7 mg.kg⁻¹MS) représentant un flux d'apport de 1,75 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

B : Boues de STEP représentant un flux d'apport de 4,8 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

FB : Fumiers de bovins représentant un flux d'apport de 2,55 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

Ph/80b/40 : engrais minéral phosphaté lié à la teneur en cadmium de 40 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ pour une dose d'apport de 80 kg P₂O₅.ha⁻¹ pour un itinéraire en monoculture blé sur un sol pauvrement pourvu en phosphore représentant un flux d'apport de 3,20 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

Ph/80b/20 : engrais minéral phosphaté lié à la teneur en cadmium de 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ pour une dose d'apport de 80 kg P₂O₅.ha⁻¹ pour un itinéraire en monoculture blé sur un sol pauvrement pourvu en phosphore représentant un flux d'apport de 1,60 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

Nul : aucun flux d'apport en cadmium *via* les intrants agronomiques (les apports en cadmium dans ce scénario sont uniquement liés aux dépôts atmosphériques et eaux d'irrigation s'ajoutant à la présence du fond géochimique).

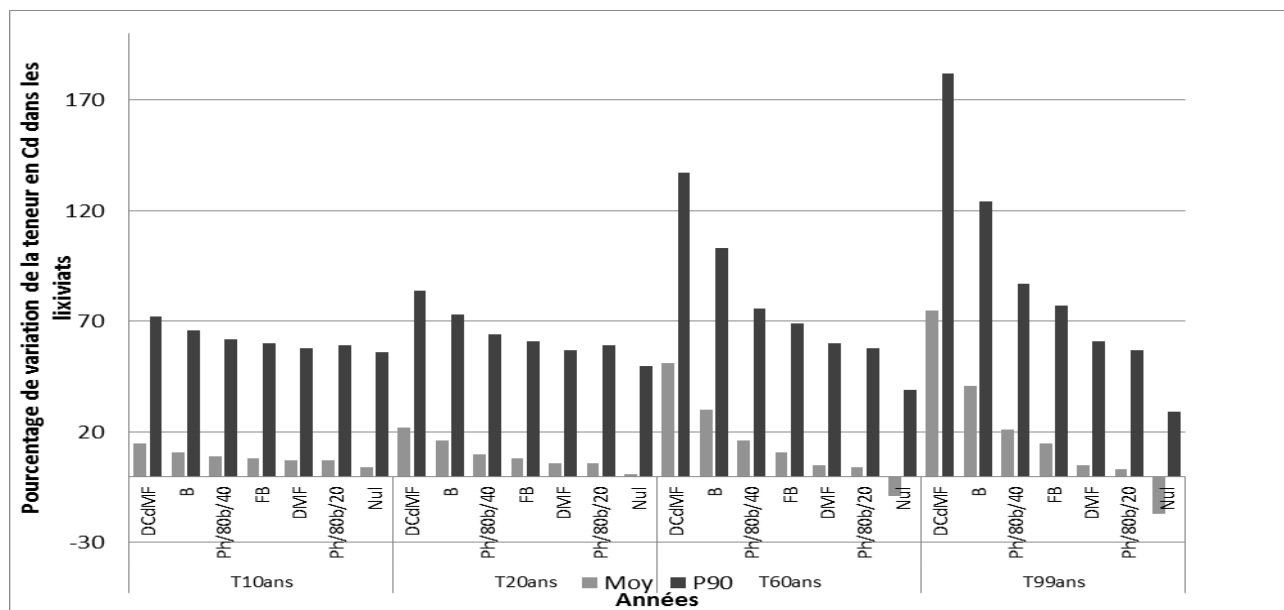


Figure 31. Variations (%) des teneurs moyennes et au décile 90 en Cd des lixiviats en fonction du flux d'apport des matières fertilisantes selon un itinéraire en monoculture blé

DCdMF : Digestat de méthanisation à la ferme lié à la teneur en cadmium réglementaire (3 mg.kg⁻¹MS) représentant un flux d'apport de 7,5 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

DMF : Digestat de méthanisation à la ferme lié à la teneur en cadmium moyenne observée (0,7 mg.kg⁻¹MS) représentant un flux d'apport de 1,75 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

B : Boues de STEP représentant un flux d'apport de 4,8 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

FB : Fumiers de bovins représentant un flux d'apport de 2,55 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

Ph/80b/40 : engrais minéral phosphaté lié à la teneur en cadmium de 40 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ pour une dose d'apport de 80 kg P₂O₅.ha⁻¹ pour un itinéraire en monoculture blé sur un sol pauvrement pourvu en phosphore représentant un flux d'apport de 3,20 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

Ph/80b/20 : engrais minéral phosphaté lié à la teneur en cadmium de 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ pour une dose d'apport de 80 kg P₂O₅.ha⁻¹ pour un itinéraire en monoculture blé sur un sol pauvrement pourvu en phosphore représentant un flux d'apport de 1,60 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

Nul : aucun flux d'apport en cadmium *via* les intrants agronomiques (les apports en cadmium dans ce scénario sont uniquement liés aux dépôts atmosphériques et eaux d'irrigation s'ajoutant à la présence du fond géochimique).

Sur la base des figures 29 et 30, il est observé une réduction moyenne de l'accumulation en cadmium dans les sols agricoles ainsi que de son transfert vers le grain de blé à la suite d'apports liés à l'épandage de digestat de méthanisation à la ferme avec une concentration moyenne en cadmium de 0,7 mg.kg⁻¹MS et d'engrais minéral phosphaté contenant une teneur en cadmium réduite de 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹, correspondant respectivement aux flux d'apports de 1,75 et 1,60 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹. Toutefois, cette diminution ne s'observe plus au centile 90. Les graphiques indiquent qu'au centile 90 au bout de 99 ans de simulation, les taux de variation par rapport à l'état initial sont au-dessus de 10% pour l'épandage de digestat de méthanisation à la ferme et d'engrais minéral phosphaté contenant une teneur en cadmium réduite de 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ (15 et 12%). Il est observé sur ces deux graphiques qu'à partir d'un flux de 2,55 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹ (fumiers de bovin), il y a une accumulation du cadmium dans les sols et un transfert du cadmium vers les grains de blé, d'autant plus que le flux croît (2,55 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹ pour les fumiers de bovins à 7,5 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹ pour les digestats de méthanisation à la ferme liés à la teneur en cadmium réglementaire, en passant par un flux d'apport de 3,20 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹ pour les engrais minéraux phosphatés avec une teneur en cadmium de 40 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ pour une dose d'apport de 80 kg P₂O₅.ha⁻¹ pour un itinéraire en monoculture blé sur un sol pauvrement pourvu en phosphore représentés sur ces graphes).

Ces valeurs calculées pour les fertilisants d'origine organique sont présentés dans les tableaux en annexe 6.

Enfin, le devenir du cadmium dans l'environnement concerne essentiellement la partie lixiviée entraînant pour tous les scénarios de flux d'apport étudiés (sauf pour le non apport de matières fertilisantes) une élévation des variations moyennes et au centile 90 du cadmium vers les eaux souterraines et superficielles (figure 31). Les graphiques (figures 29, 30, 31) montrent que la seule solution pour éviter la présence du cadmium dans les sols ainsi que son transfert dans le blé est l'abandon de la fertilisation.

2.10 Proposition de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de maîtriser la contamination en cadmium des sols, des productions végétales et l'exposition du consommateur

2.10.1 Propositions de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes au regard du risque sanitaire

Sur la base de la revue bibliographique, il est constaté que la limitation de l'apport du cadmium au sol est souhaitable dans une optique de maîtrise des contaminations des aliments, d'autant que cet élément est très persistant dans les sols, relativement biodisponible et (éco)toxique. En effet, si les concentrations en cadmium dans les intrants diminuent, cette diminution peut entraîner la diminution des teneurs en cadmium des productions végétales et par voie de conséquence l'exposition des populations au cadmium.

La méthodologie mise en œuvre, s'appuyant sur la construction d'un modèle mathématique simulant le transfert du cadmium depuis l'apport de l'intrant agricole jusqu'au consommateur, constitue un support prédictif pour la proposition de niveaux en cadmium, en termes de teneurs en cadmium dans le produit ou de flux en cadmium quelle que soit la nature et/ou le total de matières fertilisantes apportées au sol agricole.

Cet outil présente l'avantage d'être basé sur les données fiables actuellement disponibles sur le sujet et d'explicitier clairement les choix effectués, ce qui permettra le cas échéant de prendre en compte des données et connaissances nouvelles.

Au regard des résultats obtenus dans les matrices sol-plante (grain de blé, pomme de terre)-lixiviation et des simulations testées dans le modèle dans un premier temps avec des itinéraires de fertilisations liés à l'emploi d'engrais minéraux phosphatés, les résultats obtenus montrent qu'en abaissant la teneur en cadmium des engrais minéraux phosphatés, sur une durée de 99 ans, le transfert du cadmium vers la plante et l'eau lixiviée diminuent. Il est observé, sur la durée de simulation du modèle, un début de stabilisation et de réduction de l'accumulation en cadmium dans les sols ainsi que de son transfert vers les plantes et le lixiviat dès une teneur en cadmium de 40 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹ dans les engrais phosphatés selon les itinéraires de fertilisation (notamment en présence d'un temps d'impasse de fertilisation de 2 ans). Cette réduction de l'accumulation en cadmium dans les sols et de son transfert vers les cultures et le lixiviat est nettement plus marquée en présence d'une teneur en cadmium réduite à 20 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹ dans les engrais phosphatés. A l'inverse, aux deux plus fortes concentrations en cadmium dans l'engrais minéral phosphaté testées (60 et 90 mg Cd. kgP₂O₅⁻¹), une accumulation en cadmium dans le sol ainsi qu'une augmentation significative du transfert de celui-ci dans les cultures et l'eau lixiviée sont constatés, quel que soit l'itinéraire de fertilisation en monoculture blé ou rotation pomme de terre/blé/blé, avec ou sans temps d'impasse de 2 ans.

Il est toutefois noté le caractère persistant du cadmium, marqué dans les résultats liés au début du temps de projection des simulations.

Lors de l'analyse des bilans de masse entre les compartiments à l'issue des simulations, Il est remarqué que le cadmium est d'avantage transféré dans l'eau lixiviée, comparé aux matrices sol et culture. Même si l'étude de l'évolution du cadmium lixivié en fonction des itinéraires de fertilisation dépasse le contexte strict de la saisine, il est nécessaire de noter que ces transferts vers les eaux souterraines et superficielles contribuent à la contamination diffuse et généralisée de l'environnement qu'il convient de limiter dans toute la mesure du possible en raison des impacts environnementaux et sanitaires induits. Par ailleurs, ces eaux peuvent par la suite être utilisées pour l'irrigation des cultures.

Un effet « espèce végétale » influençant le transfert sol-plante et sol-lixiviation est observé.

L'ensemble de ces observations, dont la réduction du transfert du cadmium vers la plante et l'eau lixiviée avec des sols à terme plus faiblement contaminés, est corroboré avec les scénarios réalistes testés dans le modèle liés à l'emploi de seuils en cadmium dégressifs dans le temps dans les engrais minéraux phosphatés.

Ces résultats témoignent de l'intérêt d'un abaissement des teneurs réglementaires en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés vers une concentration égale ou inférieure à 20 mg Cd. $\text{kgP}_2\text{O}_5^{-1}$ afin de s'orienter vers une meilleure protection de la santé environnementale.

Au regard de la sécurité sanitaire du consommateur, il est observé un impact relativement faible sur le niveau d'exposition chronique (moyen et P95) du consommateur adulte et enfant à la suite d'une action de réduction de la concentration en cadmium jusqu'à 20 mg Cd. $\text{kgP}_2\text{O}_5^{-1}$ dans les engrais minéraux phosphatés par rapport aux situations de référence. Ceci est vraisemblablement dû au stock de cadmium présent dans l'environnement. Il est toujours observé un dépassement de la VTR orale du cadmium chez l'adulte et l'enfant, mais avec au terme de la simulation une réduction significative du pourcentage de dépassement de la VTR avec des itinéraires de fertilisation liés à une teneur en cadmium de 20 mg Cd. $\text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans les engrais minéraux phosphatés (scénarios de fertilisations à seuils en cadmium constants ou dégressifs le long de la simulation) correspondant aux scénarios présentant un taux moyen de réduction le plus élevé du niveau de contamination dans la plante. De plus, il est fait le constat que, si aucune action n'est entreprise pour réduire la teneur en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés, l'impact négatif sera conséquent pour le consommateur, avec une augmentation significative du pourcentage de la population (adulte et enfant) dépassant la VTR après 60 ou 99 ans de projection observée dans les situations de référence correspondant à l'usage d'engrais minéraux phosphatés avec le seuil actuel réglementaire de 90 mg Cd. $\text{kgP}_2\text{O}_5^{-1}$. Le pourcentage de dépassement de la VTR chez les enfants serait doublé à partir de 99 ans de projection, avec un tiers ou plus des enfants pour lesquels le risque ne pourrait être écarté. Les observations faites au regard de la sécurité du consommateur corroborent l'intérêt de diminuer la concentration du cadmium dans les intrants agricoles.

Il est toutefois remarqué que la diminution de la contamination considérée dans le modèle à la suite d'une réduction des teneurs en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés porte sur deux cultures : blé (grain) et pomme de terre, celle-ci étant répercutée sur les aliments à base de blé et pomme de terre. Les engrais minéraux phosphatés étant appliqués sur toutes cultures (et pas uniquement sur la pomme de terre et le blé modélisés ici), il est donc vraisemblable que les effets observés à la suite d'une action de réduction de la teneur en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés se répercuteront favorablement sur l'ensemble des productions végétales (consommation humaine et alimentation animale) exposées à ces intrants et par voie de conséquence sur les aliments associés présents dans l'assiette du consommateur. Ainsi, une action de réduction des teneurs en cadmium dans les intrants agricoles pourra aller dans le sens d'une diminution de la contamination des productions végétales, les sols étant épurés au fil du temps, puis de l'exposition du consommateur.

Les apports en cadmium dans les sols agricoles par les engrais minéraux phosphatés peuvent potentiellement être régulés à la source, par le choix de sources de phosphates naturellement pauvres en cadmium ou par la mise en œuvre des techniques de décadmiation. Les matières fertilisantes d'origine organique (boues de STEP, effluents d'élevage, etc.) constituent des sources

de cadmium dont la concentration est liée à une contamination environnementale généralisée et ubiquitaire (alimentation animale, rejets domestiques, rejets industriels, transports, retombées atmosphériques...). Même si les concentrations de ces matières fertilisantes sont plus difficiles à réguler, il est nécessaire pour assurer la sécurité sanitaire des aliments de les prendre en compte et de réduire les flux de cadmium qu'elles sont susceptibles d'apporter aux sols.

Ainsi, le raisonnement s'est appuyé, pour proposer des niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes, d'une part, sur celui lié à un produit mis sur le marché dont les teneurs en cadmium pourraient être maîtrisées, et d'autre part, sur celui lié au flux permettant d'agir quantitativement et temporellement sur les flux d'apport en élément au regard de la gestion durable des flux d'apport en cadmium vers les sols agricoles et les cultures.

Il a ainsi été converti les flux associés à l'emploi des engrais minéraux phosphatés testés dans le modèle (allant de 0,67 à 9 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹) puis dérivé des flux liés à l'emploi de fertilisants d'origine organique susceptibles d'être utilisés et relatifs à l'utilisation de digestats de méthanisation à la ferme, de boues de STEP, et de fumiers bovins (variant de 1,75 à 7,5 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹) pour lesquels des données sont disponibles. Afin d'analyser de façon plus complète les phénomènes d'accumulation du cadmium dans les divers compartiments et de dériver *in fine* les niveaux limites en cadmium dans les matières fertilisantes, le bilan massique des flux entrants a été évalué par le modèle (l'utilisation du modèle s'appuie sur une construction pour traiter l'apport en cadmium par tout type d'intrant sur la base que les données d'entrée du modèle correspondent à des flux d'apports en cadmium par les intrants). Ce bilan massique a été comparé avec les résultats découlant de ceux issus des simulations avec les flux entrants des fertilisants d'origine minérale phosphatée. Il est constaté que les apports de cadmium aux sols *via* les épandages de fertilisants d'origine organique ne sont pas liés à une forte concentration en cadmium des matières mais essentiellement à la quantité épandue. En s'appuyant sur un itinéraire monoculture blé, les résultats dans les matrices sol-grain de blé-lixiviation simulés montrent, à la suite de la comparaison de flux des fertilisants d'origine organique et engrais minéraux phosphatés sur un temps de projection de 99 ans, une diminution de l'accumulation du cadmium dans le sol et de son transfert vers le grain de blé à la suite d'un flux annuel testé compris entre 0,67 et 1,75 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹. Ces flux sont représentatifs des scénarios actuels utilisant les digestats de méthanisation à la ferme avec une concentration moyenne en cadmium de 0,7 mg.kg⁻¹MS et avec les fertilisants phosphatés présentant une teneur en cadmium de 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹.

La comparaison des résultats de modélisation des fertilisations par les engrais minéraux phosphatés d'une part et par les fertilisants d'origine organique d'autre part montre que, quelle que soit la nature du fertilisant, un flux d'apport en cadmium, inférieur à 2 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹ permet de garantir une meilleure protection de la santé environnementale.

2.10.2 Propositions de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes au regard des caractéristiques des sols récepteurs des intrants agricoles

Cette évaluation a été complétée par l'étude des effets des caractéristiques des sols sur le transfert du cadmium.

Par l'intermédiaire de l'analyse des caractéristiques de sols récepteurs, rendue possible par le modèle, il a été observé, à la suite de simulations d'épandage agricoles d'engrais minéraux phosphatés, un risque d'accumulation du cadmium en présence de sols agricoles déjà riches en cadmium (pouvant être lié à sa composition et ses propriétés) et/ou présentant un pH >7,5, ainsi qu'un risque de transfert du cadmium vers les cultures en présence de sols acides (pH <6,5). A l'exception des engrais minéraux phosphatés présentant une teneur égale ou inférieure à 40 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹, il est nécessaire de restreindre leurs utilisations en fonction de la typologie du sol agricole récepteur, notamment en présence :

- d'un sol riche en cadmium ($> 0,7 \text{ mg kg}^{-1}$) (cela représente 7,1% des sols agricoles liés aux cultures et prairies en France) ;
- d'un sol à $\text{pH} < 6,5$ (cela représente 50% des sols agricoles en France) ;
- et d'un sol à $\text{pH} > 7,5$ (cela représente 30% des sols agricoles en France).

Il est toutefois à noter que le cadmium s'immobilise par précipitation dans les sols basiques quelles que soient les teneurs en cadmium des engrais minéraux phosphatés.

De façon complémentaire, il est constaté dans les résultats en section 2.9.3 que les sols avec des pH acides favorisent le transfert du cadmium vers les plantes. Aussi, suite à une réduction des teneurs en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés, l'effet sur la phytodisponibilité du cadmium se distingue nettement sur les sols acides dans lesquels une diminution significative du transfert du cadmium est observée. Par conséquent, il est noté l'intérêt de réduire les concentrations en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés vis-à-vis particulièrement des sols acides qui favorisent la solubilité du cadmium et donc sa phytodisponibilité. Il est noté la possibilité d'augmenter le pH de ces sols acides par chaulage (ajout d'amendements basiques au sol) afin de limiter le transfert du cadmium vers les cultures. Une réserve est cependant émise sur ce point en fonction des apports en cadmium dans les sols: en effet, il est important de noter que de telles pratiques de chaulage, pour intéressantes qu'elles soient à court terme, représentent un danger à moyen et long terme, puisque rien ne garantit que l'augmentation de pH soit durable. *A contrario*, les processus édaphiques à l'œuvre dans le sol tendront à rétablir les équilibres physico-chimiques originels et à abaisser à nouveau le pH ce qui à terme peut favoriser les transferts du sol vers les cultures et les eaux de lixiviation.

Au regard des caractéristiques des matières fertilisantes d'origine organique et des propriétés des sols, la phytodisponibilité du cadmium peut être potentiellement réduite. En effet, l'apport de compost peut diminuer la phytodisponibilité du cadmium car l'humification de la matière organique permet une plus forte affinité avec les métaux qui sont alors adsorbés. Le rapport Cd/Zn, s'il est fortement différent dans la matière épandue et dans les sols, pourrait impacter l'absorption du cadmium du sol et donc avoir un impact sur sa phytodisponibilité. Certaines matières fertilisantes d'origine résiduaire (Mafor) peuvent avoir un effet acidifiant (boues digérées) ou chaulant (composts et boues chaulées). Lors du chaulage, la mobilité du cadmium est réduite. Les boues, les composts et les fumiers présentent de fortes teneurs en matières organiques solides et ont des capacités d'échanges cationiques importantes. Ces Mafor ont donc des phases solides sorbantes qui limitent le transfert des éléments-trace métalliques (ETM). Les Mafor avec une faible concentration d'ETM cationique (dont le cadmium fait partie) et une forte capacité de sorption limitent les ETM dans la solution de sol et donc les transferts dans les végétaux et les eaux de lixiviation. Ce point peut expliquer une baisse de transfert sol-plante des ETM cationiques suite à un épandage de fumier ou de compost. Ces constatations, liées à la compartimentation et/ou spéciation du cadmium dans les sols et les Mafor, n'ont pas pu être prises en compte dans la modélisation, faute de jeux de données exploitables actuellement disponibles (cf section 2.11.1.2). Une nouvelle fois, pour utile qu'elles puissent apparaître à court terme, il convient de ne pas négliger les conséquences potentielles de ces pratiques à moyen et long terme : le fonctionnement normal du sol conduira, à terme, à la minéralisation des matières organiques et au relargage des cations métalliques qu'elles auront temporairement adsorbés, induisant de fait des transferts et des risques accrus pour la sécurité sanitaire des aliments et l'environnement

Le travail réalisé dans le cadre de la saisine a permis la modélisation de l'évolution temporelle des concentrations en cadmium en fonction de différents scénarios d'apports de matières fertilisantes. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de réduire de manière significative les concentrations et les transferts de cadmium dans les différentes matrices concernées (sols, tissus végétaux, eaux de lixiviation) si les flux entrants sont contrôlés de manière rigoureuse.

Il importe de noter, y compris, dans le cas où les apports de matières fertilisantes ne se traduisent pas par des transferts accrus de cadmium ou d'autres éléments-trace métalliques, en raison de

l'apport de matière organique ou grâce au recours au chaulage (qui augmente le pH du sol et réduit la disponibilité des polluants métalliques), cela n'exclut pas un risque de transfert à moyen et/ou long terme vers les cultures ou les eaux continentales. En effet, s'il est possible de piéger à court terme les éléments métalliques dans le sol par des pratiques appropriées (chaulage, apport de matière organique...), il n'y a aucune garantie que cette adsorption perdure sur le long terme sauf intervention humaine répétée.

En effet, les sols sont le résultat de processus pédogénétiques se manifestant sur des durées longues, voire très longues au regard de leur mise en valeur agricole. De ce fait, les caractéristiques physico-chimiques premières d'un sol reflètent les équilibres dynamiques qui se sont mis en place au cours du temps avec la roche-mère sous l'effet du climat et des activités biologiques et microbiologiques. S'il est bien sûr possible de déplacer ces équilibres pour augmenter la capacité du sol à adsorber les polluants, il convient de garder à l'esprit que les processus naturels à l'œuvre dans le sol tendront à restaurer les équilibres initiaux, avec pour conséquence possible de rétablir à terme une forte disponibilité des polluants et donc de favoriser leurs transferts vers les eaux continentales ou les cultures. Le chaulage et/ou l'apport de matière organique sont donc des méthodes qui peuvent se révéler utiles à un instant donné mais qui ne doivent pas faire oublier que leurs résultats en termes d'adsorption des polluants dans le complexe argilo-humique du sol ne sont pas durables sauf à intervenir de manière régulière.

L'augmentation de la charge en cadmium des sols agricoles sous l'effet des apports d'engrais minéraux phosphatés et de matières fertilisantes d'origine organique et/ou d'origine résiduaire augmente les risques de transfert de cet élément dans l'alimentation et les eaux destinées à la consommation humaine. Il est considéré de façon collégiale que ce risque doit être pris en compte dans la réglementation afin d'en maîtriser l'impact.

2.10.3 Bilan

Le transfert du cadmium du sol aux végétaux dépend des caractéristiques du sol, de l'environnement et des pratiques agronomiques (selon l'objectif visé soit effet engrais, soit effet amendement). Pour observer une baisse des concentrations du cadmium dans les cultures, les mesures peuvent être la baisse d'apport du cadmium au sol, le choix des sites de cultures, le choix de pratiques agronomiques qui diminuent la présence du cadmium dans la solution de sol, la production de cultivars avec une aptitude génétique à peu absorber le cadmium (Grant et Bailey, 1998).

Considérant le caractère persistant et toxique du cadmium et dans une optique de maîtriser à terme la pollution des sols agricoles, la contamination environnementale des productions agricoles et des aliments auquel le consommateur est exposé, il est recommandé des limites en cadmium apportées par les matières fertilisantes.

Cette recommandation s'appuie sur une approche complémentaire d'une réflexion d'une concentration en cadmium dans un produit de type engrais minéral phosphaté mis sur le marché avec une possibilité de contrôler en amont la source en cadmium et d'un raisonnement en flux lié à l'utilisation de la matière fertilisante et la régularisation des apports en cadmium associés lors de son apport au sol agricole (notamment pour le cas des fertilisants d'origine organique). Cette recommandation s'appuie à la fois sur (i) une revue bibliographique, (ii) une évaluation au regard du risque sanitaire pour le sol, le lixiviat, la culture et le consommateur, à la suite de modélisation de scénarios d'utilisation spécifiques d'intrants agricoles grâce au modèle mathématique relatif à un support prédictif construit intégrant les productions végétales liées aux aliments identifiés comme contributeurs majeurs à l'exposition au cadmium du consommateur, et (iii) à l'étude de l'effet des caractéristiques des sols agricoles récepteurs.

En termes de propositions de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles, la contamination des productions agricoles et l'exposition alimentaire associée, il est par conséquent recommandé un flux annuel d'apport en cadmium

n'excédant pas $2 \text{ g Cd}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ quelles que soient la nature (engrais/amendement, organique/inorganique...) et le total de matière(s) fertilisante(s) apportée(s) au sol agricole.

Une teneur en cadmium égale ou inférieure à $20 \text{ mg Cd}\cdot\text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans les produits de type engrais minéraux phosphatés pouvant être régulés à la source permet de ne pas dépasser ce flux annuel de $2 \text{ g Cd}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$.

Bien qu'un dépassement de la VTR orale du cadmium chez l'adulte et l'enfant soit toujours observé après une action de réduction de la teneur en cadmium à $20 \text{ mg Cd}\cdot\text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans l'engrais minéral phosphaté épandu sur les sols agricoles, les résultats obtenus montrent cependant que si aucune action n'est entreprise pour réduire la teneur en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés, l'impact négatif sera conséquent pour le consommateur. Une augmentation significative du pourcentage de dépassement de la VTR est observée chez les adultes comme chez les enfants, après 60 ou 99 ans de projection dans les situations de référence correspondant à l'usage d'engrais minéraux phosphatés avec le seuil actuel réglementaire normé de $90 \text{ mg Cd}\cdot\text{kgP}_2\text{O}_5^{-1}$. Dans ces situations, le pourcentage de dépassement de la VTR chez les enfants serait doublé à partir de 99 ans de projection, avec un tiers ou plus des enfants pour lesquels le risque ne pourrait être écarté. Il est certes observé, avec des itinéraires de fertilisation liés à une teneur en Cd de $20 \text{ mg Cd}\cdot\text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans les engrais minéraux phosphatés (scénarios de fertilisations à seuils en Cd constants ou dégressifs le long de la simulation), un dépassement de la VTR orale du cadmium chez l'adulte et l'enfant, mais avec au bout de 99 ans une réduction significative de ce pourcentage. De plus, la diminution de la contamination considérée dans le modèle à la suite d'une réduction des teneurs en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés porte sur deux cultures : blé (grain) et pomme de terre, celle-ci étant répercutée sur les aliments à base de blé et pomme de terre. Les engrais minéraux phosphatés étant appliqués sur toutes cultures (et pas uniquement sur la pomme de terre et le blé modélisés ici), il est vraisemblable que les effets observés à la suite d'une action de réduction de la teneur en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés se répercuteront favorablement sur l'ensemble des productions végétales (consommation humaine et alimentation animale) exposées à ces intrants et par voie de conséquence sur l'exposition alimentaire du consommateur.

Par ailleurs, les résultats montrent qu'une teneur en cadmium inférieure à $1 \text{ mg Cd}\cdot\text{kg}^{-1}$ de matière sèche dans les fertilisants d'origine organique permettrait de ne pas dépasser le flux de $2 \text{ g Cd}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$. Toutefois, il est rappelé la difficulté à réguler à la source les concentrations en cadmium dans les fertilisants d'origine organique. La proposition d'une teneur limite réduite en cadmium pour ce type d'intrant peut certes limiter leurs usages en valorisation agricole, mais favoriser leurs réorientations vers d'autres voies d'élimination ou de valorisation (mise en décharge dans des centres de stockage, incinération des matières fertilisantes d'origine organique, méthanisation, etc.) qui peuvent également constituer des sources de pollution qu'il convient de maîtriser. Les données et informations disponibles montrent cependant, qu'actuellement le risque sanitaire lié à la présence de cadmium dans les aliments ne peut être écarté et que les pratiques actuelles qui conduisent à l'apport répété de cadmium aux sols agricoles doivent évoluer.

Ainsi, ces recommandations de niveaux maximums en cadmium dans les matières fertilisantes consistent à réduire la concentration actuelle en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés et les flux d'apport en cadmium dans l'ensemble des matières fertilisantes d'origine tant minérale qu'organique.

L'étude récemment publiée par Sterckerman *et al.* (2018 a et b) corrobore les constats faits dans ce présent travail. Il a été simulé dans cette étude le bilan massique de cadmium dans les sols en France en tenant compte de ses 22 régions suivant six scénarios de pratiques agricoles s'appuyant sur des flux d'apports moyens en cadmium dans les sols agricoles en fonction des pratiques observées sur des itinéraires régionaux liés à une série de culture (orge, blé, triticale, maïs, pomme de terre, colza, betterave, tournesol). Ce bilan massique s'est appuyé sur une combinaison de données équivalentes à celles considérées dans ce travail en termes d'identification de flux entrants (engrais minéraux phosphatés, fertilisants d'origine organique,

dépôts atmosphériques sauf les eaux d'irrigation) et sortants (culture, lixiviation) en cadmium du sol considérés dans l'approche, des caractéristiques des sols agricoles français intégrés dans leur modèle mais diffère sur l'emploi des équations de transfert des voies de sorties de cadmium du sol modélisées de façon empirique. Cette étude montre qu'il existe une sur-fertilisation des sols agricoles français pouvant induire à long terme une accumulation en cadmium dans les sols. Cette étude met en évidence l'intérêt pour la qualité des sols d'une combinaison de bonnes pratiques agricoles de fertilisation phosphatée et de la limitation de la teneur en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés avec, un abaissement progressif des teneurs en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés concordant avec la proposition liée à la révision de la réglementation des fertilisants CE. Cette étude indique que l'agriculture biologique par l'intermédiaire de fertilisants d'origine organique conduirait à une évolution du cadmium dans le sol de façon similaire à celle de l'agriculture conventionnelle en appliquant les bonnes pratiques.

Enfin, il y a d'un côté l'évaluation des risques sanitaires liés à l'apport en cadmium par les matières fertilisantes identifiées comme une source importante d'apport en cadmium, et de l'autre côté, la présence de ce contaminant dans l'environnement tel que souligné dans le traitement des incertitudes en section 2.11.3.2. Compte tenu de l'origine ubiquitaire du cadmium, il est encouragé de réduire autant que possible toutes les sources d'apport en cadmium (agricoles, industrielles, émissions atmosphériques...) afin de poursuivre l'abaissement de la contamination environnementale et *in fine* l'exposition du consommateur. Il est, par conséquent, constaté la nécessité d'une prise en compte globale de la problématique liée à la circulation générale du cadmium dans l'environnement.

2.11 Traitement des incertitudes

L'ensemble des incertitudes rencontrées tout au long du processus d'évaluation a été identifié et décrit ci-après. En l'occurrence, l'identification des sources d'incertitudes s'appuie sur une typologie composée principalement des classes suivantes :

- sources d'incertitude liées au corpus de connaissances, incluant celles liées à la variabilité (intrinsèque et liée à l'hétérogénéité) des caractéristiques d'intérêt, au regard de l'état des connaissances, de la méthode de collecte de données et des modèles existants ;
- sources d'incertitude liées à la méthode d'évaluation, au regard des données sélectionnées, des méthodes d'intégration des données et de l'interprétation des résultats ;
- sources d'incertitude liées à la communication des résultats au regard de la présentation des résultats et de l'expression des résultats.

Le tableau 19 note les incertitudes liées aux données et modèles existantes et spécifie si elles ont été intégrées dans le modèle.

2.11.1 Sources d'incertitudes liées au corpus de connaissance

2.11.1.1 Incertitudes prises en compte dans le processus d'évaluation

Ci-dessous sont listées les incertitudes identifiées relatives au corpus de connaissance et qui ont pu être intégrées dans le processus d'évaluation :

- Les doses d'apport

Il existe une grande variabilité des pratiques de fertilisation. Afin de prendre en compte l'incertitude liée aux pratiques, plusieurs itinéraires de fertilisation ont été étudiés. Ils ont été établis sur la base des préconisations agronomiques recommandées par Arvalis-Institut du Végétal et le Comifer. De

plus, l'emploi des engrais minéraux phosphatés est dépendant de l'exigence en phosphore de la culture (peu exigeante pour le blé et fortement exigeante pour la pomme de terre) et de l'offre en phosphore du sol (pauvre, moyen, riche) en France (cf. section 2.4). Il a été décidé de considérer les itinéraires de fertilisation les plus susceptibles de contribuer à l'apport en cadmium dans des sols agricoles pauvrement pourvus en phosphore par rapport aux exigences des plantes. Le processus d'évaluation s'appuie ainsi sur une situation maximaliste, c'est-à-dire nécessitant le plus d'apport en engrais phosphatés.

La variabilité liée aux caractéristiques des sols en France, aux pratiques agricoles et les incertitudes associées ont été prises en compte sans distinction en utilisant des distributions (empiriques ou paramétriques) de probabilités pour les paramètres du modèle correspondants (fonds géochimique, densité du sol, taux de carbone, matières organiques et argile du sol, pH sol, dépôts atmosphérique, précipitations annuelles, rendements, quantité d'eau d'irrigation).

2.11.1.2 Incertitudes non prises en compte dans le processus d'évaluation

Ci-dessous sont listées les incertitudes identifiées relatives au corpus de connaissance et qui n'ont pas été intégrées dans le processus d'évaluation :

- Influence de la variété végétale, du stade de développement, de l'activité biologique et des processus de régulation physiologique.

Le stade de développement, l'activité biologique et les processus de régulation physiologique (métabolisme) pour une même variété influencent ses besoins et *in fine* l'absorption en éléments inorganiques. Ces processus n'ont pas pu être intégrés dans l'évaluation au regard de l'absence d'informations pertinentes.

- La spéciation

Au sens scientifique strict, la spéciation chimique d'un élément inorganique fait référence à sa forme chimique (liaisons chimiques de l'élément étudié avec d'autres éléments ou ligands, et aussi du degré d'oxydation). Les études de spéciation chimique ont généralement pour objectif de déterminer les formes chimiques d'un élément étudié dans une matrice (sol, eau, sédiment, plante) et éventuellement de réaliser la quantification relative de ces formes. Ces études de spéciation impliquent une étape de séparation des diverses formes chimiques (par des techniques comme la chromatographie, l'électrophorèse, etc.) ou l'utilisation de spectroscopies impliquant des hautes énergies et qui nécessitent des concentrations relativement élevées dans l'échantillon (Luo *et al.*, 2017). Dans la solution du sol, le phosphore peut être absorbé par les racines des plantes sous forme H_2PO_4^- et HPO_4^{2-} (Unifa, 2018). En l'absence de ligands organiques, les principales formes du cadmium présentes dans la solution du sol sont Cd^{2+} , CdSO_4 , CdCO_3 , CdCl^+ et CdHCO_3^+ (Sposito, 1989). La spéciation chimique d'un élément influence sa solubilité, sa phytodisponibilité et phytotoxicité (Shahid *et al.*, 2017c ; Schreck *et al.*, 2014).

Cependant, les études de spéciation sur le terrain dans les écosystèmes complexes restent rares car celles-ci sont coûteuses et longues. De plus, la spéciation chimique d'un élément peut évoluer dans le sol sous l'influence de l'activité biologique, des variations de pH, etc. D'une façon opérationnelle, c'est la compartimentation des éléments qui est beaucoup plus fréquemment étudiée. Cette notion de compartimentation concerne la répartition d'un élément chimique entre différents compartiments du sol (phase solide/solution du sol, fraction minérale/fraction organique, etc.) ou d'une plante (racines/parties aériennes, certains organes tels que les nervures ou les vacuoles, etc.). Par exemple, en raison de leur forte réactivité (surfaces spécifiques et charges électriques élevées), les matières organiques du sol sont souvent enrichies en métaux (Quenea *et al.*, 2009).

Dans le présent rapport, les données de terrain utilisées pour bâtir le modèle prédictif présentent l'intérêt de refléter la réalité des pratiques et de représenter des scénarios réalistes de cultures. Pour ces études de terrain, les données de spéciation chimique sont rares et il est principalement question de compartimentation du phosphore et du cadmium.

Bien que les auteurs du présent rapport soient convaincus par l'influence de la spéciation chimique des éléments inorganiques sur leur réactivité, biodisponibilité et (éco)toxicité attestée par de nombreuses publications, en raison du peu de données disponibles sur ce sujet dans le cadre des études de terrain utilisables pour la modélisation, il n'a pas été possible d'intégrer ce paramètre. Une des perspectives d'amélioration future du modèle consistera à intégrer la spéciation chimique du phosphore et du cadmium sous réserve de disposer alors de nouvelles données scientifiques contextualisées (cultures de plein champs, caractéristiques du sol et des matières fertilisantes apportées, etc.).

- Variabilité des concentrations en cadmium des fertilisants d'origine organique

Les matières organiques des sols (MOS) constituent un compartiment particulièrement hétérogène, réactif (exemples : adsorption des métaux, formation de résidus liés avec les polluants organiques, formation du complexe argilo-humique) et dynamique (sous l'effet de l'activité biologique, elles peuvent se fragmenter, se transformer, être minéralisées). Les MOS ont fait l'objet de nombreuses publications qui concernent des aspects variés tels que leur caractérisation bio-physico-chimique (exemples : détermination de leur composition, vitesses de dégradation), leurs fonctions (exemples : nutrition des plantes, support de la vie biologique du sol, rétention des contaminants, stockage de carbone et d'eau) et les services écosystémiques dont elles sont à l'origine (exemples : fertilité des sols, atténuation/adaptation au changement climatique, régulation des flux d'eau, réduction de l'érosion). Récemment, l'expertise collective INRA, CNRS, Irstea⁴³ menée sur les matières fertilisantes d'origine résiduaire a montré le rôle majeur de la matière organique dans la fertilité des sols. Elle a également rapporté sa contribution à l'atténuation du changement climatique (avec 0,23 tonne de carbone stocké pour une tonne de carbone apportée par les fumiers apportés au sol (tC/tC), 0,70 tC/tC composts de boues ou de déchets verts ou 0,60 tC/tC de compost de biodéchets).

Bien que les MOS fraîches et/ou évoluées aient été étudiées depuis des décennies, leur complexité intrinsèque rend difficile l'entreprise d'une modélisation précise entre les caractéristiques des matières organiques et leur réactivité.

Dans le cadre de la présente saisine, en raison de cette forte complexité des matières fertilisantes d'origine organique fraîches utilisées comme engrais et amendements, et de leur évolution une fois épandues et incorporées aux sols, les données scientifiques actuellement disponibles sont insuffisantes pour réaliser un travail de modélisation identique à celui effectué pour les engrais minéraux phosphatés commerciaux. C'est pourquoi les experts impliqués dans la saisine ont choisi (i) d'aborder ce sujet crucial des matières fertilisantes d'origine organique épandues aux sols, car elles participent au flux de cadmium et ne doivent donc pas être écartées ; (ii) dans un esprit de rigueur scientifique, ces matières organiques n'ont pas été actuellement intégrées pour la construction du modèle. De façon scientifiquement plus détaillée, les matières organiques des sols ont des rôles importants sur la fertilité des sols : forte capacité de fixation des éléments chimiques en lien avec la capacité d'échange cationique, avec des conséquences sur la disponibilité des nutriments et polluants (Quenea *et al.*, 2009) ; amélioration de la structure et vie biologique du sol (Leveque *et al.*, 2015) en lien avec les effets d'engrais et amendements des matières organiques des sols, avec des conséquences sur la réduction de croûte de battance et d'érosion ; amélioration de la rétention en eau du sol (Mombo *et al.*, 2018).

⁴³ Rapport final de l'ESCo "Matières fertilisantes d'origine résiduaire" – octobre 2014

2.11.2 Sources d'incertitudes liées à la méthode d'évaluation

2.11.2.1 Incertitudes prises en compte dans le processus d'évaluation

Ci-dessous sont listées les incertitudes identifiées relatives à la méthode d'évaluation et qui ont pu être intégrées dans le processus d'évaluation :

- Simulation des concentrations au cours du temps

L'incertitude liée à la combinaison de plusieurs sources de données indépendantes (caractéristiques des sols, quantité d'eau d'irrigation et d'eau de pluie, rendement des cultures) a été prise en compte par le biais des simulations. Un grand nombre de simulations étant réalisées (10 000), l'ensemble des combinaisons possibles a été balayé et permet de traiter de nombreux cas possibles. Cela peut par contre engendrer des combinaisons non réalistes comme une quantité d'eau d'arrosage importante pour des sols présents dans des régions déjà pluvieuses. Le pourcentage de scénarios non réalistes et leur impact sur la concentration en cadmium n'a pas été testé.

2.11.2.2 Incertitudes non prises en compte dans le processus d'évaluation

Ci-dessous sont listées les incertitudes identifiées relatives à la méthode d'évaluation et qui n'ont pas été intégrées dans le processus d'évaluation :

- Les cultures

Au regard des données et des modèles existants (Smolders et Six, 2013 ; SCHER, 2015 ; KEMI, 2011, cf. section 2.5), les itinéraires de fertilisation retenus dans le cadre de l'évaluation s'appuient sur des orientations agronomiques liées à deux cultures seulement : le blé et la pomme de terre. Ces deux cultures ont été identifiées à l'origine des aliments contributeurs majeurs de l'exposition des consommateurs au cadmium (Anses, 2011a). Toutefois, les matières fertilisantes peuvent être utilisées dans tous types de cultures et cela n'a pu être traité.

- Les équations de transfert sol-cultures

Le transfert du cadmium du sol à la végétation dépend des caractéristiques du sol (pH, teneur en argiles, teneur en matière organique, capacité d'échange cationique...), et des pratiques agronomiques décrites dans la méthode d'évaluation et nécessitant l'intégration d'équations de transfert sol-plante. Le choix des modèles de transfert du cadmium du sol vers les plantes (blé dur, blé tendre et pomme de terre) a été fait à la lecture de la littérature scientifique (Ran *et al.*, 2016 ; Franz *et al.*, 2008), sur la base des critères suivants : la contamination du sol en cadmium n'était pas issue d'activités industrielles et les paramètres de l'équation peuvent être renseignés par les données du RMQS (GIS Sol). Afin de choisir entre les équations de Ran et Franz pour le transfert du cadmium du sol vers la pomme de terre, l'impact sur les concentrations a été testé. Celle de Franz a été retenue car elle produit les résultats les plus protecteurs (cadmium plus élevé).

L'équation de transfert retenue pour le transfert du sol vers la culture blé (Ran *et al.* (2016)) ne fait pas la distinction entre le blé dur et le blé tendre et ne tient donc pas compte de l'effet de l'espèce végétale qui dans le cas du blé dur et du blé tendre peut entraîner une variabilité. Un essai publié par Grant *et al.*, (2008) montre qu'une variété fortement accumulatrice peut atteindre une concentration de 0.41 mg Cd.kg⁻¹ dans le grain de blé dur alors qu'une variété faiblement accumulatrice n'en montrera que 0.08 mg Cd.kg⁻¹. Les effets génotypiques de cette variation ont aussi été suggérés par Gao en 2011 (Gao *et al.*, 2011).

Par ailleurs, Grant *et al.*, (2002) estiment que l'augmentation de la concentration des grains de blé dur en cadmium n'est pas en lien avec l'augmentation de la teneur en cadmium dans les engrais

minéraux phosphatés (les concentrations en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés expérimentés étaient comprises entre 0,2 et 186 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$). Selon leur recherche menée sur 3 ans, la baisse de la concentration du cadmium dans les fertilisants n'aurait pas d'incidence sur sa concentration dans le grain l'année de l'application. Par contre, la baisse de la concentration de cadmium dans les engrais minéraux phosphatés a un effet sur la diminution de la quantité de cadmium dans le sol agricole.

- Données d'entrée liées au calcul du transfert du cadmium *via* la lixiviation

Les données d'entrée liées à l'équation décrivant la lixiviation s'appuient sur le calcul de la concentration en cadmium dans la solution du sol, calcul effectué à partir des publications de De Vries *et al.*, (2011, 2013) qui ont trait à un environnement australien qui peut être différent de l'environnement français. L'incertitude liée aux paramètres définis dans l'équation n'a pas été prise en compte. Néanmoins, cela représente les seules données disponibles. L'étude de Sterckerman *et al.* (2018a) confirme le manque de données sur la lixiviation dans les sols agricoles français et le besoin du développement de ces dernières. Les auteurs concluent que l'exactitude des bilans de masse pourrait être améliorée par une meilleure évaluation de la lixiviation au cadmium. Cette publication met en évidence les conséquences sur le bilan massique des résultats calculés de la part de cadmium lixivié avec différents facteurs jouant sur le flux de sortie de cadmium lixivié et suivant six scénarios de pratiques agricoles en France. Toutefois, les données d'entrée liées au calcul du transfert du cadmium par la lixiviation de la saisine s'appuient sur une situation maximaliste dans le contexte d'une évaluation des risques sanitaire.

- Ajustements de lois sur les données

Des distributions ont été déterminées à partir des informations disponibles (moyenne, centiles etc.). L'incertitude liée au choix du type de lois et à la détermination des paramètres n'a pas été traitée. Cela concerne plusieurs variables d'entrées du modèle : densité du sol, quantité et concentration d'eau d'irrigation des cultures blé et pomme de terre, rendement des cultures blé et pomme de terre.

- Données d'entrée du modèle « consommateur »

Le modèle estimant l'exposition du consommateur fait appel aux données de consommation de l'étude INCA2 (Afssa, 2009), qui comportent des incertitudes difficilement quantifiables liées à la représentativité de l'échantillon, l'estimation des consommations alimentaires (biais de déclaration, de mémorisation des déclarants, précision des outils de quantification, etc.), et du poids corporel (selon le cas du poids déclaré ou mesuré ou estimé). En particulier, le choix d'exclure les individus sous-déclarants pourrait conduire à surestimer les forts centiles de consommation et donc d'exposition, et donc le pourcentage de dépassement de la VTR. Ces choix sont néanmoins protecteurs dans une optique d'évaluation des risques sanitaires.

Les données de contamination de l'EAT2 (Anses, 2011a) comportent des incertitudes liées notamment à la sélection des aliments, à la représentativité de l'échantillonnage, aux aspects métrologiques des laboratoires (c'est-à-dire la mesure analytique) et au traitement de la censure. Les aliments sélectionnés dans l'EAT2 couvrent environ 90% de la consommation moyenne nationale des adultes et des enfants, ce qui conduit à une légère sous-estimation de l'exposition totale. Il est très délicat de qualifier les incertitudes liées à la représentativité de l'échantillonnage sachant que 15 sous-échantillons individuels sont combinés pour obtenir la concentration moyenne de l'aliment considéré. Le traitement et la présentation des résultats d'exposition par scénarios englobants, LB et UB, permet d'incorporer explicitement l'incertitude associée aux données censurées.

Faute de données plus récentes et de facteurs de procédé pour les teneurs de cadmium initiales dans les ingrédients à base de blé dur et de blé tendre, les concentrations moyennes calculées à partir de données de 2000 à 2010 de l'IRTAC et de l'interprofession ont été retenues pour les calculs d'exposition.

S'agissant de la concentration du cadmium dans la plante, sa distribution n'est pas constante. Or, dans le modèle « consommateur », il a été considéré, à défaut de facteurs de procédé, que l'impact d'une modification de teneur moyenne dans la plante (blé ou pomme de terre) entraînait la même modification de teneur dans l'aliment tel que consommé pour la pomme de terre, et dans l'ingrédient (farine, son de blé, etc.) pour les aliments à base de blé. Cette hypothèse de calcul a été retenue car considérée comme protectrice.

- Changement global des paramètres sur la durée de modélisation liée à un temps de projection sur 99 ans

Les paramètres d'entrées dans le modèle ont été considérés constants sur le temps de projection de 99 ans utilisé pour la modélisation. Ces paramètres font notamment référence :

- au climat,
- à la typologie des sols (pH, fond géochimique, matières organiques, argile etc),
- aux pratiques agricoles,
- aux concentrations en cadmium évolutifs dans les intrants agricoles, plus particulièrement pour les fertilisants d'origine organique,
- aux données de consommation des aliments,
- aux données de contamination des aliments autres que la pomme de terre et les aliments à base de blé.

Bien que ces paramètres évoluent dans le temps, la prédiction de leurs évolutions est difficile à intégrer dans la modélisation.

En effet, des années climatiques particulières peuvent entraîner des différences de prélèvement du cadmium par le végétal. Les relations entre les paramètres climatiques et les teneurs dans les végétaux sont actuellement encore mal renseignées pour être prises en compte dans la modélisation.

Au regard des pratiques agricoles et des parcelles concernées, leurs caractéristiques évoluent au fil du temps. En l'état actuel des connaissances, il est difficile de prédire l'évolution des pratiques agricoles sur les 99 prochaines années.

Concernant les habitudes de consommation, celles-ci évoluent comme constaté dans la troisième étude individuelle nationale de consommation alimentaire de l'Anses (INCA 3) (2017). Or, il n'est pas possible de prédire l'évolution des consommations alimentaires sur les 99 prochaines années.

Dans la modélisation sur 99 ans, les contaminations en cadmium des aliments à base de blé et pomme de terre ont été estimées avec le modèle. Les concentrations des autres aliments ont été considérées comme constantes. Cependant, les contaminations des aliments évoluent avec le temps, comme le montre par exemple la comparaison entre la première et la deuxième étude de l'alimentation totale de l'Anses réalisées à une décennie d'intervalle (Anses, 2011a).

- Valeur toxicologique de référence par voie orale du cadmium

La valeur toxicologique de référence par ingestion du cadmium considérée dans cette évaluation a été construite à partir de données et d'une méthodologie présentant des facteurs d'incertitudes, notamment identifiés au préalable dans le rapport de la question 1 de la présente saisine. Les incertitudes liées à la construction de cette VTR n'ont pas été intégrées dans la présente évaluation.

2.11.3 Sources d'incertitudes liées à la communication des résultats

2.11.3.1 Difficultés de respecter les flux pour les amendements organiques

Les flux proposés en section 2.10 sont contraignants pour les amendements organiques.

L'expertise collective menée par l'Inra, le CNRS et l'Irstea⁴⁴ sur le recyclage de déchets organiques en agriculture rapporte que l'apport d'amendements organiques pourrait avoir un effet sur la biodisponibilité du cadmium du fait de l'apport de matière organique chélatante, de la modification de la capacité d'échanges cationiques, ou de matériaux chaulés qui ont une incidence sur le pH des sols (exemple : boues de STEP). Cette expertise a montré que *« la littérature scientifique ne permet pas de dégager une tendance unique. L'épandage des Mafor a un effet variable sur le transfert sol-plante des ETM, dépendant de l'ETM, de la dose appliquée, des caractéristiques physico-chimiques de la Mafor et du sol récepteur, de l'espèce végétale et de l'organe ciblé. Par rapport à la littérature scientifique, l'absence d'effet des Mafor sur la concentration en ETM des plantes cultivées est nettement plus fréquente dans le contexte agricole français actuel car les teneurs en contaminants inorganiques des produits résiduels sont faibles et les quantités épandues sont modérées. C'est en grande partie dû à l'Arrêté français du 8 janvier 1998 réglementant l'épandage des boues sur sols agricoles. Cet arrêté reprend souvent de manière plus sévère les seuils réglementaires européens fixant les valeurs limites pour les concentrations en métaux des sols récepteurs, des boues épandues ainsi que les flux maxima d'ETM autorisés (directive européenne 86/278/CEE). En conséquence, depuis que les épandages de Mafor satisfont ces seuils, dans la très grande majorité des cas, il n'est pas constaté d'augmentation significative de la teneur des plantes en ETM »*. Dans le cas particulier du cadmium, l'expertise montre les résultats d'un travail de l'ADEME (2003) qui a répertorié les mesures de transferts des ETM dans les végétaux. Ce dernier travail n'a jamais montré d'augmentation du cadmium dans les végétaux sauf pour les rafles de maïs. Les essais ont porté sur la betterave, le blé tendre (tiges et grains) et le maïs (tiges, rafles, grains), la vigne, le colza et l'orge.

2.11.3.2 Difficultés de diminuer les niveaux de contamination des aliments et l'exposition alimentaire associée

L'efficacité modérée en termes d'impact sanitaire à la suite d'une action à la source sur les niveaux en cadmium des engrais phosphatés s'explique par le fait que le cadmium est un contaminant ubiquitaire présent dans la majorité des aliments. Pour la population générale, la plus forte contribution d'un aliment n'excède pas 22% (Anses, 2011b). Par ailleurs, le règlement (CE) n°1881/2006 fixe des teneurs maximales en cadmium dans les denrées alimentaires imposant des niveaux de contamination peu excessivement élevés. Pour avoir un impact significatif, cela suppose de devoir agir dans une optique globale à long terme sur plusieurs groupes d'aliments et plusieurs sources d'origine du cadmium dans l'environnement et le long de la chaîne alimentaire.

⁴⁴ Le chapitre dédié aux Conséquences de l'épandage de Mafor en termes de contamination de l'environnement (p655-660 consultées) est disponible à l'adresse suivante (visitée le 31/10/2017) <https://inra-dam-front-resources-cdn.brainsonic.com/ressources/afile/259228-ffafd-resource-esco-mafor-rapport-chapitre-4.html>

2.12. Recommandations et perspectives

Les données et informations disponibles montrent d'une part, qu'à ce jour, le risque sanitaire lié à la présence de cadmium dans les aliments ne peut être écarté et, d'autre part, que les pratiques actuelles en termes de matières fertilisantes conduisent à une augmentation des concentrations dans les sols et donc dans les denrées alimentaires.

Le travail réalisé dans le cadre de la saisine a permis la modélisation de l'évolution temporelle des concentrations en cadmium en fonction de différents scénarios d'apports de matières fertilisantes. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible de réduire de manière significative les concentrations et les transferts de cadmium dans les différentes matrices concernées (sols, tissus végétaux, eaux de lixiviation) jusqu'au consommateur si les flux entrants sont contrôlés de manière rigoureuse.

Dans le but de maîtriser la pollution des sols agricoles, la contamination des productions agricoles et par conséquent l'exposition alimentaire associée, il est recommandé que le flux annuel d'apport en cadmium n'excède pas $2 \text{ g Cd}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ quelles que soient la nature (engrais/amendement, origine organique/minérale...) et la quantité totale de matière(s) fertilisante(s) apportée(s) au sol agricole.

Une teneur en cadmium égale ou inférieure à $20 \text{ mg Cd}\cdot\text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans les produits de type engrais minéraux phosphatés pouvant être régulés à la source permet de ne pas dépasser ce flux annuel de $2 \text{ g Cd}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$.

Par ailleurs, les résultats montrent qu'une teneur en cadmium inférieure à $1 \text{ mg Cd}\cdot\text{kg}^{-1}$ de matière sèche dans les fertilisants d'origine organique permettrait de respecter ce flux. Au vu de la difficulté à maîtriser les concentrations en cadmium dans les fertilisants d'origine organique, la recommandation d'une teneur limite en cadmium dans ce type d'intrant peut conduire à limiter leur usage en valorisation agricole et favoriser leur réorientation vers d'autres voies d'élimination ou de valorisation (mise en décharge dans des centres de stockage, incinération, méthanisation, etc.) qui peuvent également constituer des sources de pollution qu'il convient de maîtriser.

Il est également recommandé que toute matière fertilisante soit renseignée sur sa teneur en cadmium avant épandage.

Par ailleurs, le fait de recourir à des pratiques agricoles pouvant piéger à court terme le cadmium, telles que le chaulage, l'apport de matières organiques ou encore des techniques de remédiation comme la phytostabilisation, ne constitue pas une solution durable. En effet, ces techniques ne permettent de piéger le cadmium que temporairement et, en fonction des apports en contaminant, ne garantissent pas que cette adsorption perdure à moyen et long terme sauf intervention humaine répétée. Elles ne peuvent donc pas se substituer à une politique active de réduction des apports de cadmium sur les sols agricoles.

Au regard des éléments explicités ci-dessus, il est notamment recommandé que, la charge en cadmium des sols agricoles sous l'effet des apports d'engrais minéraux phosphatés et de matières fertilisantes d'origine organique et/ou d'origine résiduaire soit limitée, afin de réduire les risques de transfert de cet élément dans l'alimentation et les eaux destinées à la consommation humaine.

Par ailleurs, des axes de recherche et des perspectives ont été identifiées dans une démarche d'amélioration continue.

Pour réduire les teneurs en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés, il peut être mis en œuvre des techniques de décadmiation. Actuellement, l'efficacité et le coût des procédés de décadmiation pour améliorer la qualité des engrais minéraux phosphatés ne sont pas encore optimisés. Il est recommandé le développement de la recherche afin d'optimiser et développer ces procédés. Il a également été constaté que les fertilisants d'origine organique sont assez peu étudiés et que leur composition en termes de contaminants est très variable. Il serait là aussi nécessaire de développer la recherche sur la caractérisation de ces intrants agronomiques.

Afin de réduire les incertitudes identifiées, il est noté le besoin de données complémentaires, notamment sur des sujets liés à la phytodisponibilité, à la spéciation du cadmium, au transfert sol-plante-animal-denrées alimentaires d'origine animale, etc. Des enquêtes auprès des agriculteurs et des vendeurs/producteurs de MFSC permettraient aussi d'améliorer la précision sur les quantités d'engrais phosphatés épandus.

Enfin, compte tenu de l'origine ubiquitaire du cadmium, il est recommandé de réduire autant que possible toutes les sources d'apport en cadmium (agricoles, industrielles, émissions atmosphériques...) afin de poursuivre l'abaissement de la contamination environnementale et in fine l'exposition du consommateur. Il est, par conséquent, constaté la nécessité d'une prise en compte globale de la problématique liée à la circulation générale du cadmium dans l'environnement.

3 Conclusions

Le cadmium (Cd) est un métal de transition ubiquitaire présent dans les différents compartiments de l'environnement (sols, eau et air) du fait de sa présence à l'état naturel dans la croûte terrestre et des apports anthropiques liés aux activités industrielles et aux pratiques agricoles. Le cadmium dans le sol peut exister sous forme soluble dans l'eau du sol et sous forme de complexes insolubles avec des constituants inorganiques et organiques du sol. Le cadmium dans le sol tend à être plus disponible lorsque le pH du sol est bas. Le cadmium soluble pénètre facilement dans les végétaux par leurs racines. Le cadmium est également parfois adsorbé par les végétaux par leurs parties aériennes. Le cadmium entre ainsi dans la chaîne alimentaire (Efsa, 2009).

Le cadmium est un contaminant préoccupant pour l'Homme. Le cadmium se caractérise par un comportement bioaccumulable. La population générale y est exposée principalement par la voie alimentaire, hors tabagisme (Efsa, 2009, 2012). Chez l'Homme, le cadmium est largement distribué dans l'organisme, dans lequel il s'accumule avec le temps. La demi-vie d'élimination biologique est comprise entre 10 et 30 ans (12 ans en moyenne). Le cadmium est principalement présent dans le foie et les reins (ATSDR, 2012). Une exposition prolongée par voie orale au cadmium induit, chez l'Homme, une néphropathie, des pathologies osseuses, des troubles de la reproduction ainsi qu'un risque accru de cancer de plusieurs organes (poumon, prostate et rein) ayant donné lieu à un classement « cancérigène pour l'Homme » (groupe 1) pour le cadmium et ses composés par le Centre International de Recherche sur le Cancer en 2012 (IARC, 2012) et dans la catégorie 2⁴⁵ par l'Union européenne en 2004 (JOCE, 2004).

Selon l'avis et le rapport de l'Anses relatifs à la deuxième étude de l'alimentation totale (EAT2) publiés en juin 2011 (Anses, 2011a), l'exposition alimentaire des personnes en France au cadmium apparaît en augmentation par rapport à la précédente étude de l'alimentation totale parue en 2004. Un dépassement de la valeur toxicologique de référence (VTR) définie par l'Efsa en 2009 est constaté chez 0,6% des adultes et 15% des enfants. Cela indique qu'un risque sanitaire ne peut être écarté. Suite à cette deuxième EAT, l'Anses a émis un avis relatif à la révision des teneurs maximales en cadmium des denrées alimentaires destinées à l'Homme (Anses, 2011b). Celui-ci recommande, afin de réduire l'exposition de la population, d'agir sur le niveau de contamination des sources environnementales, en particulier au niveau des intrants (engrais minéraux notamment phosphatés, fertilisants et amendements organiques...) à l'origine en partie de la contamination des sols et des aliments.

La volonté de maîtriser l'apport en cadmium provenant des matières fertilisantes n'est pas récente et se traduit dans la réglementation française par des critères d'innocuité, définis pour les autorisations de mise sur le marché des MFSC et qui sont repris par des normes portant sur des MFSC particulières. La Commission européenne souhaite réviser la réglementation relative aux matières fertilisantes avec pour objectif la fixation de nouvelles valeurs limites des contaminants dans l'ensemble des matières fertilisantes, notamment pour le cadmium, prenant en compte les effets adverses du cadmium pour l'Homme et l'environnement.

Au regard, d'une part de l'intérêt agronomique de l'épandage sur les sols agricoles des matières fertilisantes et d'autre part, de l'identification de ces matières fertilisantes comme source de contamination environnementale et d'impact sanitaire par l'apport de cadmium dans la chaîne

⁴⁵ Correspondant à la catégorie 1B actuelle définie par le règlement (CE) N°1272/2008 : substance présumée cancérigène chez l'être humain

alimentaire, l'Anses est saisie par ses cinq tutelles pour proposer des niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de réduire la pollution des sols agricoles et la contamination des productions végétales, et *de facto* l'exposition alimentaire du consommateur.

L'enjeu de la démarche est de diminuer la contamination en cadmium des sols et cultures, afin de préserver la santé du consommateur au regard de son exposition au cadmium.

L'expertise s'est basée dans un premier temps sur une analyse critique des travaux européens existants sur le sujet. L'analyse critique des documents européens confirme la nécessité de limiter l'apport en cadmium dans les sols agricoles, notamment par l'intermédiaire d'une diminution des seuils en cadmium dans les matières fertilisantes. Puis, un état de l'art du transfert du cadmium depuis les sources environnementales d'apport en cadmium dans les sols agricoles jusqu'à l'exposition du consommateur en vue de la proposition de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes a été menée. Il est jugé nécessaire de produire un modèle pour évaluer au cours du temps l'évolution de la teneur en cadmium dans les sols français, la contamination des productions végétales et *de facto*, l'exposition alimentaire associée, en tenant compte des spécificités françaises. Cet outil permet de répondre de façon plus pertinente et de proposer une valeur maximale en cadmium dans les matières fertilisantes utilisables en France sur la base d'une méthodologie explicitée et d'une argumentation scientifique rigoureuse. Ce travail se focalise prioritairement sur l'emploi des engrais phosphatés commercialisés, source majoritaire identifiée d'apport en cadmium dans les sols pour laquelle de nombreuses données scientifiques sont disponibles dont la qualité et la quantité permettent de bâtir un modèle, tout en traitant autant que possible les autres voies d'apport.

La méthodologie a permis la construction d'un modèle mathématique évaluant le transfert du cadmium depuis l'apport de la matière fertilisante dans le sol jusqu'à la plante suite à une action à la source, et tenant compte de l'ensemble des voies d'entrée (matières fertilisantes, dépôts atmosphériques, eaux d'irrigation) et des voies de sortie du cadmium du sol (culture à vocation alimentaire et lixiviation) le long de ce transfert. Le modèle mathématique s'appuie d'abord sur une approche de bilan massique (mass-balance»). L'évolution des niveaux de contamination en cadmium des cultures en fonction des itinéraires de fertilisation liés à l'usage des matières fertilisantes a ensuite été répercutée sur l'exposition alimentaire associée pour évaluer le risque pour la santé du consommateur. La valeur seuil en cadmium dans les matières fertilisantes qui est proposée découle des résultats issus de ce modèle (en fonction de divers scénarios testés) intégrant les différents processus à l'œuvre de la fourche à la fourchette. Il a d'abord été choisi d'élaborer le modèle à partir de calculs d'itinéraires de fertilisation phosphatée sur la base de l'emploi d'une matière fertilisante de type engrais minéral phosphaté, source majoritaire identifiée d'apport en cadmium dans les sols agricoles. Ce choix permet également de disposer des données maîtrisées pour les engrais minéraux phosphatés et de la possibilité de tester différents teneurs en cadmium dans l'engrais phosphaté (notamment sur la base du seuil réglementaire actuel normé dans les engrais phosphatés de 90 mg Cd.kg^{-1} en masse d'équivalent d'anhydride phosphorique (P_2O_5) ainsi que les seuils réduits proposés dans le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE de la Commission européenne pour les engrais phosphatés de 60, 40 et $20 \text{ mg Cd.kg P}_2\text{O}_5^{-1}$). L'exploitation du modèle, intégrant des données d'entrées liées à des flux entrants de cadmium (résultant des teneurs en cadmium et de la quantité d'apport de la source), a ensuite été élargie, à l'usage d'autres matières fertilisantes plus complexes (effluents d'élevage, boues de STEP, digestat de méthanisation) pour lesquels quelques données sont disponibles. Ces autres matières fertilisantes sont, en effet, également susceptibles d'apporter du cadmium dans les sols. A noter que parmi les matières fertilisantes, les amendements calciques et magnésiens ne sont pas pris en compte dans le modèle en raison de leur très faible contribution à la contamination en cadmium.

La fertilisation de toutes les cultures par les engrais ne pouvant être prises en compte dans la construction du modèle, il a été décidé de limiter le modèle à la fertilisation phosphatée de deux

cultures identifiées comme étant à l'origine des aliments contributeurs majeurs à l'exposition du consommateur au cadmium (céréales et produits à base de céréales ainsi que des pommes de terre et produits apparentés). Dans le cadre des itinéraires de fertilisation phosphatée, les pratiques agricoles courantes liées aux cultures de blé et de pomme de terre ont été considérées. Le modèle s'appuie sur un usage agricole en monoculture blé ou en rotation pomme de terre/blé/blé en fonction d'apports annuels ou d'apports avec un temps d'impasse de deux ans sur la base des préconisations agronomiques et les grilles de coefficient de Arvalis-Institut du Végétal et du Comifer sur la fertilisation phosphatée. Les modélisations des transferts du cadmium issues des itinéraires de fertilisation liés à l'emploi d'engrais minéraux phosphatés depuis les sols jusqu'aux cultures et eaux de lixiviation présentent la particularité dans ce travail d'être accompagnées de comparaisons des flux entrants sur les sols avec des fertilisants d'origine organique. Plus de vingt scénarios d'itinéraires de fertilisation (et les flux correspondant de cadmium) ont ainsi été testés. Le modèle mathématique construit présente la particularité d'être adapté selon la nature de la matière fertilisante apportée pour toutes les simulations en permettant de faire varier les flux entrants en cadmium en fonction des pratiques agronomiques et du temps de projection jusqu'à 99 ans.

Des concentrations modélisées en cadmium dans le sol, le blé, la pomme de terre et les eaux lixiviées sont créées sur 99 ans à l'aide de simulations Monte-Carlo. Pour un itinéraire donné, 10 000 parcelles sont simulées. Les simulations tiennent compte de la diversité des parcelles agricoles présentes en France où chaque parcelle est définie par un vecteur contenant la concentration en cadmium liée au fond géochimique, les concentrations en matière organique, en argile et en carbone ainsi que le pH du sol. La variabilité des paramètres (exemples : quantité d'eau de pluie, rendement des cultures etc) a été considérée en tirant aléatoirement une valeur différente par parcelle et par année directement dans les distributions ajustées aux données, ainsi que l'incertitude en fonction de paramètres a pu être considérée. L'algorithme a été programmé sous le logiciel R (version 3.4.0, 21-04-2017) et une application a été développée sous R-shiny permettant à l'utilisateur de sélectionner l'itinéraire qu'il souhaite simuler. Les moyennes et centiles des concentrations en cadmium dans le sol, la plante (blé et pomme de terre) et lixiviées sur l'ensemble des parcelles sont ensuite présentés dans des tables et graphiques. Une analyse en fonction du type de sol ainsi que des paramètres d'entrée est fournie. Une analyse de sensibilité au nombre de parcelles simulées a été réalisée et montre que la simulation de 10 000 parcelles est suffisante pour obtenir des résultats stables. Les variations de concentration en cadmium (réduction ou augmentation) dans les grains de blé et les pommes de terre en fonction du scénario de fertilisation obtenues préalablement au cours des simulations au cours du temps par rapport à la première année d'apport de référence ont ensuite été répercutées sur la contamination moyenne en cadmium dérivée de l'EAT2 des aliments et ingrédients à base de blé et pommes de terre (contributeurs majeurs à l'exposition du consommateur au cadmium), sur la base d'un modèle existant établi par l'Anses sur l'exposition alimentaire (Anses, 2011b). Les conséquences de la modification des teneurs en cadmium dans les aliments à base de blé sont notamment transformées par l'intermédiaire de calculs liés à la décomposition des recettes pour les aliments à base de blé tendre et de blé dur. L'impact sur l'exposition alimentaire du consommateur au cadmium est ainsi estimé.

In fine, les données de sortie du modèle permettent de déduire l'exposition chronique moyenne et au 95ème centile du consommateur adulte et enfant, en fonction du temps de projection de la modélisation (10, 20, 60, 99 ans), en corrélation avec l'étude de l'évolution de la contamination du cadmium dans les cultures (blé et pomme de terre) liée aux scénarios de fertilisation entrés dans le modèle. Le taux de dépassement de la valeur toxicologique de référence (VTR) par voie orale du cadmium ainsi que son intervalle de confiance à 95% (IC95%) selon le scénario, sont calculés sur la base de la VTR révisée par l'Anses dans cette saisine.

La pertinence prédictive du modèle a été évaluée au regard des concentrations en cadmium dans le sol, le blé, la pomme de terre et lixiviées générées par le modèle mathématique au début des simulations. Le modèle élaboré, constitue un support prédictif cohérent pour estimer – pendant une durée allant jusqu'à 99 ans et en fonction de scénarios réalistes d'apports de cadmium au sol - l'évolution de la part de cadmium lixivié ainsi que l'évolution des niveaux de contamination en

cadmium dans les sols agricoles, dans les plantes (blé et pomme de terre) et dans les produits alimentaires finaux apparentés. La méthode permet d'évaluer quantitativement le risque sanitaire associé.

Le raisonnement pour dériver des niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes s'appuie, d'une part, sur une réflexion d'une teneur en cadmium dans un produit (par exemple pour les engrais minéraux phosphatés commercialisés), et d'autre part, sur une réflexion liée à un flux d'apport en cadmium par les matières fertilisantes dans le but d'une maîtrise d'apport en cadmium sur les sols agricoles. La méthodologie mise en œuvre, s'appuyant sur la construction d'un modèle mathématique simulant le transfert du cadmium depuis l'apport de l'intrant agricole jusqu'au consommateur, constitue un support prédictif sur la proposition de niveaux en cadmium, en termes de teneurs en cadmium dans le produit ou de flux en cadmium quelle que soit la nature et/ou le total de matières fertilisantes apportées au sol agricole.

Cet outil présente l'avantage d'être basé sur les données fiables actuellement disponibles sur le sujet et d'explicitier clairement les choix effectués, ce qui permettra le cas échéant de prendre en compte des données et connaissances nouvelles.

Les résultats des simulations ont été analysés au regard, d'une part, du risque sanitaire et, d'autre part, des caractéristiques des sols agricoles récepteurs.

La modélisation de l'évolution temporelle des concentrations en cadmium en fonction de différents scénarios d'apports de matières fertilisantes montre qu'il est possible de réduire de manière significative les concentrations en cadmium dans les sols et ses transferts vers les végétaux et eaux de lixiviation si les flux entrants sont contrôlés de manière rigoureuse. Cela entraînerait une diminution des expositions du consommateur au cadmium.

Dans le but de maîtriser la pollution des sols agricoles, la contamination des productions agricoles et par conséquent l'exposition alimentaire associée, il est recommandé que le flux annuel d'apport en cadmium n'excède pas $2 \text{ g Cd} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ quelles que soient la nature (engrais/amendement, origine organique/minérale...) et la quantité totale de matière(s) fertilisante(s) apportée(s) au sol agricole.

Une teneur en cadmium égale ou inférieure à $20 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans les produits de type engrais minéraux phosphatés pouvant être régulés à la source permet de ne pas dépasser ce flux annuel de $2 \text{ g Cd} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$.

Par ailleurs, les résultats montrent qu'une teneur en cadmium inférieure à $1 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg}^{-1}$ de matière sèche dans les fertilisants d'origine organique permettrait de respecter ce flux. Au vu de la difficulté à maîtriser les concentrations en cadmium dans les fertilisants d'origine organique, la recommandation d'une teneur limite en cadmium dans ce type d'intrant peut conduire à limiter leur usage en valorisation agricole et favoriser leur réorientation vers d'autres voies d'élimination ou de valorisation (mise en décharge dans des centres de stockage, incinération, méthanisation, etc.) qui peuvent également constituer des sources de pollution qu'il convient de maîtriser.

Il est également recommandé que toute matière fertilisante soit renseignée sur sa teneur en cadmium avant épandage.

Par ailleurs, le fait de recourir à des pratiques agricoles pouvant piéger à court terme le cadmium, telles que le chaulage, l'apport de matières organiques ou encore des techniques de remédiation comme la phytostabilisation, ne constitue pas une solution durable. En effet, ces techniques ne permettent de piéger le cadmium que temporairement et, en fonction des apports en contaminant, ne garantissent pas que cette adsorption perdure à moyen et long terme sauf intervention humaine répétée. Elles ne peuvent donc pas se substituer à une politique active de réduction des apports de cadmium sur les sols agricoles.

Le traitement de cette troisième question de la saisine a permis d'identifier des pistes de recherches. Sur la base notamment du traitement des incertitudes effectué dans ce travail, le besoin de produire des informations et des données complémentaires a aussi été identifié dans une démarche d'amélioration continue.

Enfin, l'évaluation par l'Anses a permis de :

- (i) réviser les effets toxicologiques du cadmium sur la santé humaine et la VTR par ingestion du cadmium ;
- (ii) d'étudier la filière professionnelle des matières fertilisantes et les sources de contaminations en cadmium associées ;

afin d'*in fine* (iii) de recommander des niveaux en cadmium permettant de maîtriser et réduire la pollution des sols agricoles, la contamination des productions végétales et l'exposition alimentaire au cadmium du consommateur.

Ces trois axes interagissant entre eux permettent de mieux appréhender l'exposition humaine au cadmium (figure 32).

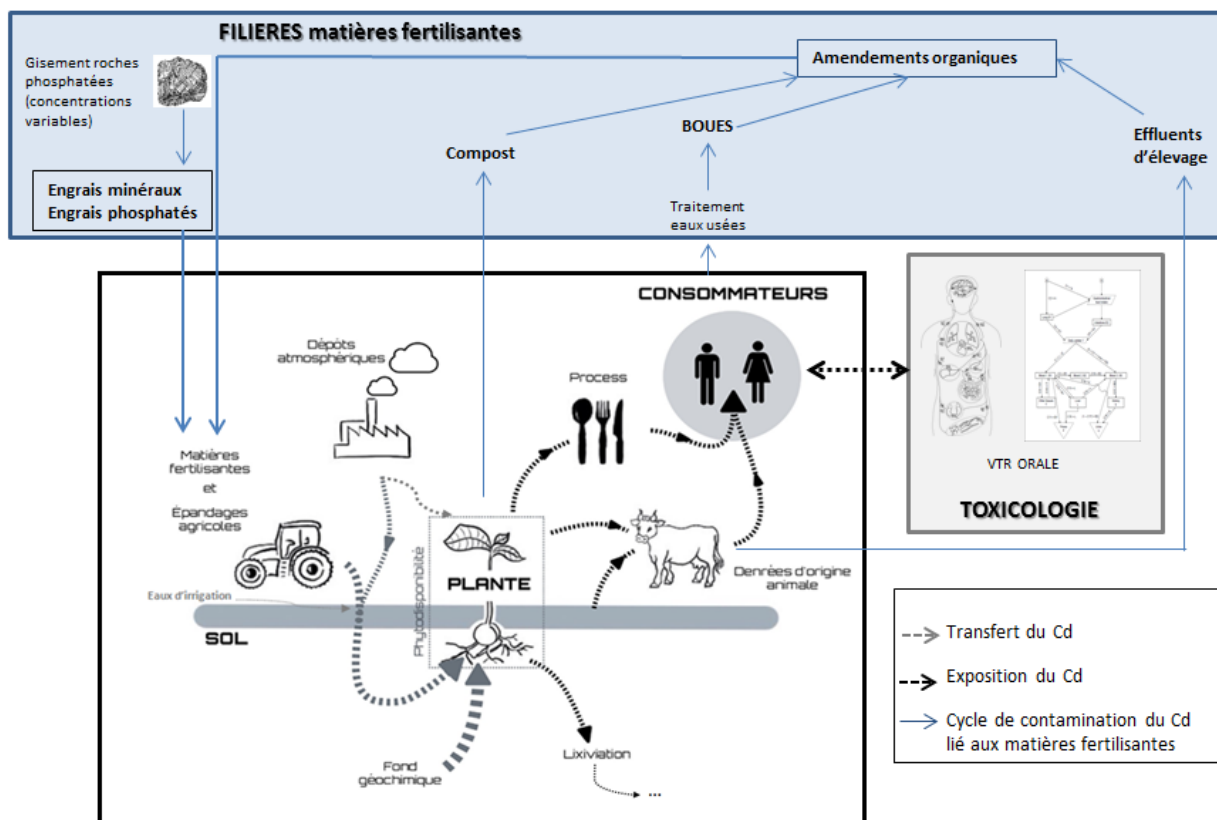


Figure 32. Exposition humaine au cadmium - Depuis ses sources dans l'environnement, dont la filière des matières fertilisantes, jusqu'à l'exposition du consommateur au regard de sa toxicologie

4 Bibliographie

4.1 Publications

ADEME. (2003). Teneurs des plantes à vocation alimentaire en éléments traces suite à l'épandage de déchets organiques. Synthèse d'essais agronomiques français et modélisation des transferts sol-plante. Rapport final, pp. 79.

ADEME/APCA. (2005). Dérogations relatives à la réglementation sur l'épandage des boues de stations d'épuration. Comment formuler une demande pour les sols à teneurs naturelles élevées en éléments traces métalliques ? Guide technique. J. Béraud et A. Bispo. (Coordinateurs). D. Baize, T. Sterckeman, A. Piquet, H. Ciesielski, J. Béraud et A. Bispo (Auteurs). 142 p.

ADEME/SOGREAH. (2007). Bilan des Flux de Contaminants Entrant sur les Sols Agricoles de France Métropolitaine. Rapport final, pp. 330.

ADEME. (2011). Qualité agronomique et sanitaire des digestats. Rapport final du contrat n° 0906C0053. (<http://www.ademe.fr/qualite-agronomique-sanitaire-digestats>), pp. 250.

AFSSA. (2008). Avis de l'Agence française de sécurité sanitaire des aliments relatif à un avis sur la valorisation par des filières alimentaires, des sols pollués par les métaux lourds des plaines de Pierrelaye et Achères. (Saisine 2008-SA-023).

AFSSA. (2009). Etude Individuelle Nationale des Consommations Alimentaires 2 (INCA2) (2006-2007)

Agence de l'Eau Rhin Meuse. (2003.) Système d'évaluation de la qualité de l'eau, des cours d'eaux. Grilles d'évaluation SEQ-EAU Version 2. rhin-meuse.eaufrance.fr/IMG/pdf/grilles-seq-eau-v2.pdf.

Ahmad P., Nabi G., Ashraf M. (2011). Cadmium-induced oxidative damage in mustard [*Brassica juncea* (L.) Czern. & Coss.] plants can be alleviated by salicylic acid. *S Afr J Bot* 77:36–44

Ahmad I., Akhtar M.J., Asghar H.N., Ghafoor U., Shahid M. (2015). Differential effects of plant growth-promoting rhizobacteria on maize growth and Cd uptake. *J Plant Growth Regul.* doi:10.1007/s00344-015-9534-5

Akoumianakis K.A., Passam H.C., Barouchas P.E., Moustakas N.K. (2008). Effect of cadmium on yield and cadmium concentration in the edible tissues of endive (*Cichorium endivia* L.) and rocket (*Eruca sativa* Mill.). *J Food Agric Environ* 6:206–209

AND International. (2002). Evaluation des quantités actuelles et futures de déchets épandus sur les sols agricoles et provenant des activités industrielles hors agroalimentaire.

ANSES. (2011a). Avis de l'Anses et rapport d'expertise relatifs à l'Etude de l'Alimentation Française 2 (EAT2) - Tome 1 : Contaminants inorganiques, minéraux, polluants organiques persistants, mycotoxines, phyto-estrogènes, Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort.

ANSES. (2011b). Avis de l'Anses relatif à la révision des teneurs maximales en cadmium des denrées alimentaires destinées à l'homme. (saisine n°2011-SA-0194), Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, Maisons-Alfort.

ANSES. (2016). Avis et rapport de l'Anses relatif à l'exposition alimentaire des enfants de moins de 3 ans à certaines substances – Etude de l'Alimentation Totale Infantile (EAT infantile).

- ANSES. (2017). Avis et rapport de l'Anses relatif à l'étude individuelle nationale des consommations alimentaires 3 (INCA 3).
- ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. (2012). Toxicity profile for cadmium. U.S. Department of Health and Human Services.
- Baker NR. (1991). A possible role for photosystem II in environmental perturbations of photosynthesis. *Physiol Plant* 81:563–570
- Baize, D., Deslais, W., & Gaiffe, M. (1999). Anomalies naturelles en cadmium dans les sols de France. *Etude et gestion des Sols*, 2, 85-104.
- Baize D. (2000). Teneurs totales en " métaux lourds " dans les sols français - résultats généraux du programme ASPITET. *Courrier de l'environnement de l'INRA* n° 39, février 2000.
- Baize D., Tercé M. (2002). Les éléments traces métalliques dans les sols. *Approches fonctionnelles et spatiales*, INRA, Paris, 565 p.
- Baize D., Saby N., Deslay W., Bispo A., Feix I. (2006). Analyses totales et pseudo-totales d'éléments en traces dans les sols – Principaux résultats et enseignements d'une collecte nationale. *Étude et gestion des sols*, 3 : 181-200, <http://www.gissol.fr/programme/bdetm/bdetm.php>.
- Baize D. (2009). Éléments traces dans les sols - Fonds géochimiques, fonds pédogéochimiques naturels et teneurs agricoles habituelles : définitions et utilités. *Courrier de l'environnement de l'INRA* n° 57, juillet 2009.
- Belimov A.A., Hontzeas N., Safronova V.I., Demchinskaya S.V., Piluzza G., Bullitta S., Glick B.R. (2005). Cadmium-tolerant plant growth-promoting bacteria associated with the roots of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern.). *Soil Biol Biochem* 37:241–250
- Belon E., Boisson M., Déportes IZ., Eglin TK., Feix I., Bispo AO., Galsomies L., Leblond S., Guellier C. R. (2012). An inventory of trace elements inputs to French agricultural soils. *Science of The Total Environment* 439:87-95.
- Benoît P., Brugère H., Casellas M., Dabert P., Fuchs J., Giamberini L., *et al.* (2014). ESCo "Matières fertilisantes d'origine résiduaire". Caractéristiques physico-chimiques et biologiques des Mafor. . Rapport final de l'expertise collective. Chapitre 2. 2014: 212.
- Birke, M., Reimann, C., Rauch, U., Ladenberger, A., Demetriades, A., Jähne-Klingberg, F., & Team, T. G. P. (2017). GEMAS: Cadmium distribution and its sources in agricultural and grazing land soil of Europe — Original data versus clr-transformed data. *Journal of geochemical exploration*, 173, 13-30
- CCME (Conseil canadien des ministres de l'environnement). (1996). Annexe XXI — Recommandations pour la qualité des eaux au Canada : mise à jour (mai 1996), cadmium, dans *Recommandations pour la qualité des eaux au Canada*, Conseil canadien des ministres des ressources et de l'environnement. 1987.
- Chambre d'agriculture Bretagne, SNCVA, Cemagref. (2007). Les bonnes pratiques d'épandage du fumier. 2007: 29 pages. Guide disponible : [http://www.synagri.com/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/08890/\\$File/bonnes%20pratiques%20epandage%20FUMIER.pdf?OpenElement](http://www.synagri.com/ca1/PJ.nsf/TECHPJPARCLEF/08890/$File/bonnes%20pratiques%20epandage%20FUMIER.pdf?OpenElement).
- Charonnat C., Deportes I., Feix I., Merillot JM. (2001). Approche de la qualité des composts de déchets en France. Résultat d'une enquête en 1998. ADEME Editions, 2001, pp. 135 P.
- Chen W, Lu S., Peng C., Jiao W., Wang M. (2013). Accumulation of Cd in agricultural soil under long-term reclaimed water irrigation. *Environmental Pollution*, 178: 294-299.

- COMIFER (1993) Aide au diagnostic et à la prescription de la fertilisation phosphate et potassique des grandes cultures, in: COMIFER (Ed.), 28 p
- Conseil supérieur d'hygiène publique de France. (1998). Risques sanitaires liés aux boues d'épuration des eaux usées. Ed. Lavoisier Tec & Doc, Paris, 108 p.
- CSTEE, Scientific Committee on Toxicity, Ecotoxicity and the Environment Brussels (2002). Opinion on "The Member State Assessments of the Risk to Health and the Environment from Cadmium in Fertilizers".
- Dahmani-Muller H., van Oort F., Balabane M. (2000). Metal extraction by *Arabidopsis halleri* grown on an unpolluted soil amended with various metal-bearing solids: a pot experiment. *Environ Pollut* 114:77–84.
- Denaix L., Semlali R.M., Douay F. (2001). Dissolved and colloidal transfer of Cd, Pb and Zn in a silt loam soil affected by atmospheric industrial deposition. *Environ. Pollut.*, 114 : 29 –38.
- Denaix L., Semlali R.M., Douay F. (2002). Transferts de Zn, Pb et Cd par voie soluble ou colloïdale. In *Les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales*. D. Baize, M. Tercé ed., INRA éditions, pp. 255 - 267.
- Denoroy P., Dubrulle P., Villette C., Colomb B., Fayet G., Schoeser, M., Marin-Lafèche A., Pellerin F., Pellerin S., Boiffin J. (2004). RegiFert - Interpréter les résultats des analyses de terre, in: INRA - *Techniques et pratiques* (Ed.), 129 p.
- De Vries., McLaughlin., Groenenberg. (2011). Transfer functions for solide-solution partitioning of cadmium for Australian soils. *Environmental Pollution* 159 (2011) 3583-3594.
- De Vries., McLaughlin. (2013). Modeling the cadmium balance in Australian agricultural systems in view of potential impacts on food and water quality. *Science of the Total Environment* 461–462 (2013) 240–257.
- European Food Safety Authority, EFSA (2008). Guidance Document for the use of the Concise European Food Consumption Database in Exposure Assessment.
- European Food Safety Authority, EFSA. (2009). Cadmium in food. Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain. *The EFSA Journal* 980, 1-139.
- European Food Safety Authority, EFSA. (2012). Cadmium dietary exposure in the European population. *EFSA Journal* 2012;10(1):2551. [37 pp.] doi:10.2903/j.efsa.2012.2551.
- Elgallal M., Fletcher L., Evans B. (2016). Assessment of potential risks associated with chemicals in wastewater used for irrigation in arid and semiarid zones: A review. *Agricultural Water Management* 177 (2016) 419–431.
- Engström A., Michaëlsson K., Suwazono Y., Wolk A., Vahter M., Åkesson A. (2011). Longterm cadmium exposure and the association with bone mineral density and fractures in a population-based study among women. *J Bone Miner Res* 2011;26: 486–95.
- Engström A., Michaëlsson K., Vahter M., Julin B., Wolk A., Åkesson A. (2012). Associations between dietary cadmium exposure and bone mineral density and risk of osteoporosis and fractures among women. *Bone* 50 (2012) 1372–1378.
- FERTILIZER EUROPE. (2013). Revisiting and updating the effect of phosphate fertilizers to cadmium accumulation in European agricultural soils.
- Follain, S., Schvartz, C., Denoroy, P., Villette, C., Saby, N. P., Arrouays, D., Lemerrier, B. et Walter, C. (2009). A method for assessing available phosphorus content in arable topsoils over large spatial scales. *Agronomy for sustainable development*, 29(2), 371-379.

- Franz E, Römkens P, van Raamsdonk L, Fels-Klerx Vd. (2008). A chain modeling approach to estimate the impact of soil cadmium pollution on human dietary exposure. *Journal of Food Protection* 2008; 71: 2504-2513.
- Gallego S.M., Pena L.B., Barcia R.A., Azpilicueta C.E., Iannone M.F., Rosales E.P., Zawoznik M.S., Groppa M.D., Benavides M.P. (2012). Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants: Insight into regulatory mechanisms. *Environ Exp Bot* 83:33–46
- Garate A., Ramos I., Manzanares M., Lucena J.J. (1993). Cadmium uptake and distribution in three cultivars of *Lactuca* sp. *Bull Environ Contam Toxicol* 50
- Gill SS., Khan NA., Tuteja N. (2012). Cadmium at high dose perturbs growth, photosynthesis and nitrogen metabolism while at low dose it up regulates sulfur assimilation and antioxidant machinery in garden cress (*Lepidium sativum* L.). *Plant Sci* 182:112–120
- Gonneau C., Genevois N., Frérot H., Sirguy C., Sterckeman T. (2014). Variation of trace metal accumulation, major nutrient uptake and growth parameters and their correlations in 22 populations of *Noccaea caerulescens*. *Plant Soil* 384:271–287
- Grant C., Bailey L. (1998). Nitrogen, phosphorus and zinc management effects on grain yield and cadmium concentration in two cultivars of durum wheat. *Canadian Journal of Plant Science* 1998; 78: 63-70.
- Grant C. A., Bailey L.D, Harapiak J.T, Flore N.A. (2002). Effect of phosphate source, rate and cadmium content and use of *Penicillium bilaii* on phosphorus, zinc and cadmium concentration in durum wheat grain. *Journal of the Sciences of Food and Agriculture*. Volume 82, Issue3, February 2002, Pages 301-308
- Grant C. A., Clarke, J. M., Duguid, S.& Chaney, R. L. (2008) Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation. *Science of the Total Environment*, 390 (2-3): 301-310.
- Grant C., Sheppard SC. (2008) Fertilizer impacts on cadmium availability in agricultural soils and crops. *Human and Ecological Risk Assessment* 2008; 14: 210-228. Grant C. (2011). Influence of phosphate fertilizer on cadmium in agricultural soils and crops. *Japanese Society of Pedology* 2011: 143-155.
- Greter-Domergue F.L., Vedy J.C. (1989). Entraînement gravitaire de Cd, Cu, Zn dans des sols reconstitués avec des boues compostées. *Science du Sol*, 27, 227 - 242.
- Harrison R.M., Chirgawi M.B. (1989). The assessment of air and soil as contributors of some trace metals to vegetable plants I: Use of a filtered air growth cabinet. *Sci. Total Environ.* 83:13–34.
- IARC, International Agency for Research on Cancer, 2012. Cadmium. Vol 100C.121-145.
- IARC (1993). IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Beryllium, cadmium, mercury, and exposures in the glass manufacturing industry. IARC, Lyon, France.
- INRS (2016). Cadmium et composés minéraux. Fiche toxicologique n°60. www.inrs.fr/dms/ficheTox/FicheFicheTox/FICHETOX_60-5/FicheTox_60.pdf.
- Irstea, SOLAGRO. (2012). Etat de l'art des digestats et leur procédés de post traitement (projet DIVA). Porojet ANR - 10 - BIOE - 007 2012; Livrables 2.1, 2.2, 2.3, 3.1: 76pp. Disponible : <https://diva.irstea.fr/livrables/>.
- JECFA (2011) Evaluation of certain food additives and contaminants. 73rd report of the joint FAO/WHO expert committee on food additive. WHO Technical Report Series 960.
- Jean J., Sirot V., Vasseur P., Narbonne J-F., Leblanc J-C., Volatier J-L., Rivière G. (2015). Impact of a modification of food regulation on cadmium exposure. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 73 (2015) 478e483

- Jurjanz S., Feidt C., Pérez-Prieto L.A., Ribeiro Filho H.M.N., Rychen G., Delagarde R. (2012). Soil intake of lactating dairy cows in intensive strip grazing systems. *Animal*, 6, 1350–1359.
- Jumeau S., Tonnellier B., Chiquet A., Hennebert J., Hocquet P., Duhamel B. (2001). Bilan des micropolluants organiques, éléments traces métalliques, paramètres agronomiques, pH et matières sèches des boues de station d'épuration d'effluents urbains. In: n°0075011 CALWELS, editor, 2001, pp. 165p.
- Juste C., Tauzin J. (1992). Comparaison de la biodisponibilité du cadmium contenu dans différentes matières fertilisantes. *C.R. Acad. Agric. Fr* 78(3):71-79.
- JOCE (2004). Commission Directive 2004/73/EC, 29th time Council directive 67/548EEC. Official Journal of the European Communities.
- Khalid S., Shahid M., Khan Niazi N., Murtaza B., Bibi I., Dumat C. (2017). A comparison of technologies for remediation of heavy metal contaminated soils. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 247-268.
- Keller C., Vedy J.C. (1991). Apport de la lysimétrie sans tension pour l'étude des transferts de Cu et de Cd dans les sols forestiers faiblement pollués. *Science du Sol*, 29, 107 – 124.
- Kjellström T., Nordberg GF. (1978). A kinetic model of cadmium metabolism in the human being. *Environ Res* 16:248–269.
- Kranner I., Colville L. (2011). Metals and seeds: Biochemical and molecular implications and their significance for seed germination. *Environ Exp Bot* 72:93–105
- Laane, R. (1992). Background concentrations of natural compounds in rivers, sea water, atmosphere and mussels. Ministry of transport, public works and water management, DGW-92.033.
- Lado L. R., Hengl T., Reuter, H. I. (2008). Heavy metals in European soils: a geostatistical analysis of the FOREGS Geochemical database. *Geoderma*, 148(2), 189-199.
- Laurent C., Feidt C., Laurent F. (2005). Contamination des sols. Transfert des sols vers les animaux. Ademe & EDP Sciences ed. Paris, 216 p.
- Levasseur P (2005). Composition des effluents porcins et de leurs coproduits de traitement — Quantités produites. ITP edition; 2005.
- Lévêque T., Capowiez Y., Schreck E., Mombo S., Mazzia C., Foucault Y., Dumat C. (2015). Effects of historic metal (loid) pollution on earthworm communities. *Science of the Total Environment*, 511, 738-746
- Lin L., Zhou W., Dai H., Cao F., Zhang G., Wu F. (2012). Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice. *J Hazard Mater* 235-236:343–351
- Lux A., Martinka M., Vaculík M., White PJ. (2011). Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review. *J Exp Bot* 62:21–37
- Marmioli M., Pighi V., Savo-Sardaro M.L., Marmioli N. (2014). The effect of silicon on the uptake and translocation of arsenic in tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Environ Exp Bot* 99:9–17
- Meng W., Wang Z., Hu B., Wang Z.L., Li H., Goodman R.C. (2016). Heavy metals in soil and plants after long-term sewage irrigation at Tianjin China: A case study assessment. *Agricultural Water Management*, 171, 153–161.
- Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales/Commission des Matières Fertilisantes et des Supports de Culture. Guide d'élaboration du dossier technique concernant les matières fertilisantes ou les supports de culture candidats à l'inscription dans une norme française existante ou à créer — Annexe VII. CERFA n°50644#01; 2003. p. 19–20. On line version, last

access 03/09/2012: http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/projects/envasso/documents/ENV_Vol-I_Final2_web.pdf.

Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt. (2014). Enquête pratiques culturelles 2011 : Principaux résultats. Agreste Les dossiers n°21. 70pp.

Mombo S., Foucault Y., Deola F., Gaillard I., Goix S., Shahid M., Schreck E., Pierart A., Dumat C. (2016). Management of human health risk in the context of kitchen gardens polluted by lead and cadmium near a lead recycling company. *J Soils Sediments*. doi:10.1007/s11368-015-1069-7

Mombo S., Laplanche C., Besson P., Sammartino S., Schreck E., Dumat C., Capowiez Y. (2018). Metal soil pollution differentially affects both the behaviour and exposure of *A. caliginosa* and *L. terrestris*: a mesocosm study. *Biology and Fertility of Soils*, *Biology and Fertility of Soils*, 54, 3, pp 319–328

Nishizono H., Ichikawa H., Suzuki S., Ishii F. (1987). The role of the root cell wall in the heavy metal tolerance of *Athyrium yokoscense*. *Plant Soil* 101:15–20

Nziguheba, G., Smolders, E. (2008). Inputs of trace elements in agricultural soils via phosphate fertilizers in European countries. *Science of the Total Environment*, 390(1), 53-57.

Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. (2003). Rapport sur la qualité de l'eau et de l'assainissement en France par M. Gérard MIQUEL, Sénateur. Tome II. Annexes. 293 p.

Plassard C., Robin A., Le Cadre E., Marsden C., Trap J., Herrmann L., Waithaisong K., Lesueur D., Blanchart E., Chapuis-Lardy L., Hinsinger P. (2015). Améliorer la biodisponibilité du phosphore : comment valoriser les compétences des plantes et les mécanismes biologiques du sol ? *Innovations Agronomiques* 43 (2015), 115-138

Plateau A (2001). Effluents d'élevage - Elaboration d'un référentiel national, Paramètres agronomiques classiques et éléments traces métalliques des effluents d'élevage bovin, ovin et caprin. Rapport de stage de fin d'étude d'ingénieur Ecole Supérieure d'Agriculture d'Angers; 2001.

Qi et al., 2018 / STOTEN, Cadmium solubility and bioavailability in soils amended with acidic and neutral biochar

Qiu R-L., Zhao X., Tang Y-T., Yu F-M., Hu P-J. (2008). Antioxidative response to Cd in a newly discovered cadmium hyperaccumulator, *Arabis paniculata* F. *Chemosphere* 74:6–12

Quenea, K. ; Lamy, I. ; Winterton, P. ; Bermond, A. ; Dumat, C. (2009). Interactions between metals and soil organic matter in various particle size fractions of soil contaminated with waste water. 2009. *Geoderma*, 149, 217-223

Ran J., Wang D., Wang C., Zhang G., Zhang H. (2016). Heavy metal contents, distribution, and prediction in a regional soil–wheat system. *Science of The Total Environment* 2016; 544: 422-431.

Redondo-Gómez S., Mateos-Naranjo E., Andrades-Moreno L. (2010). Accumulation and tolerance characteristics of cadmium in a halophytic Cd-hyperaccumulator, *Arthrocnemum macrostachyum*. *J Hazard Mater* 184:299–307

Roberts, T. L. (2014). Cadmium and phosphorous fertilizers: the issues and the science. *Procedia Engineering*, 83, 52-59.

Römkens P., De Vries W. and Kros H. 2017. Dynamic Cadmium balances in arable soils and grassland soils in the EU: impact of revision of fertiliser regulation on accumulation rates and levels of Cd in soils – preliminary results as of June 14, 2017 - Wageningen Environmental Research (Alterra) <https://cdn2.hubspot.net/hubfs/2828618/downloads/dynamic-cadmium-balances-in-arable-soils-and-grassland-soils-in-the-eu.pdf?t=1509722697959>

- Rosén K., Eriksson J., Vinichuk M. (2012). Uptake and translocation of ¹⁰⁹Cd and stable Cd within tobacco plants (*Nicotiana sylvestris*). *J Environ Radioact* 113: 16–20
- Saby N. P. A., Thioulouse J., Jolivet C. C., Ratié C., Boulonne L., Bispo A., & Arrouays D. (2009). Multivariate analysis of the spatial patterns of 8 trace elements using the French soil monitoring network data. *Science of the Total Environment*, 407(21), 5644-5652.
- Saby N., Gouny L., Foucaud B., Lemercier, Denoroy P., Eveillard P. (2016). Utilisation des données de la BDAT pour étudier l'évolution spatio-temporelle des teneurs en Magnésium échangeable, Potassium échangeable et Phosphore extractible dans les sols agricoles de France métropolitaine. [Contrat] auto-saisine. 2016. <hal-01581567
- Santos-Echeandía J., Vale C., Caetano M., Pereira P., Prego R. (2010). Effect of tidal flooding on metal distribution in pore waters of marsh sediments and its transport to water column (Tagus estuary, Portugal). *Mar Environ Res* 70(5):358-367
- Sauerbeck D. (1982). The environmental significance of the cadmium content in phosphores fertilizers. *Landbauforschung Volkenrode* 32, 192-197.
- SCHER, Scientific Committee on Health and Environmental Risks. (2015). Final Opinion on new conclusions regarding future trends of cadmium accumulation in EU arable soils. Adopted by the SCHER during its plenary meeting of 27 November 2015.
- Shahid M., Dumat C., Khalid S., Niazi NK., Antunes PM. (2017a). Cadmium Bioavailability, Uptake, Toxicity and Detoxification in Soil-Plant System. *Rev Environ Contam Toxicol*. 241: 73-137.
- Shahid M., Dumat C., Khalid S., Schreck E., Xiong T., Niazi N.K. (2017b). Foliar heavy metal uptake, toxicity and detoxication in plants: A comparison of foliar and root metal uptake. *Journal of Hazardous Materials*, Elsevier, 2017, vol. 325, pp. 36-58.
- Shahid M., Shamshad S., Rafiq M., Khalid S., Bibi I., Niazi NK., Dumat C. (2017c). Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system: A review. *Chemosphere* 178, 513-533.
- Sheng X-F., Xia J.J. (2006). Improvement of rape (*Brassica napus*) plant growth and cadmium uptake by cadmium-resistant bacteria. *Chemosphere* 64:1036–1042
- Shi H., Ye H., Chan Z. (2015). Nitric oxide-activated hydrogen sulfide is essential for cadmium stress response in bermudagrass (*Cynodon dactylon* (L). Pers.). *Plant Physiol Biochem* 74:99–107
- Schreck E, Foucault Y, Sarret G, Sobanska S, Cécillon L, Castrec-Rouelle M, Uzu G, Dumat C. (2012). Foliar uptake of metals and metalloids by various plants in the context of sanitary risk assessment under urban atmospheric pollution. *Sc. Total Environment*, 427–428, 253-262.
- Schreck E., Dappe V., Sarret G., Sobanska S., Nowak D., Nowak J., Stefaniak E.A., Magnin V., Ranieri V., Dumat C. (2014). Foliar or root exposures to smelter particles: consequences for lead compartmentalization and speciation in plant leaves. *Sci Total Environ* 476-477:667–676.
- Smolders E., Nziguheba G. (2006). Trace elements in mineral fertilizers used in Europe (EU15)-report to NiPERA. In: 040603-c-KUL C, editor, 2006.
- Smolders E., Six L. (2014). Future trends in soil cadmium concentration under current cadmium fluxes to European agricultural soils. *Science of the Total Environment* 485–486 (2014) 319–328
- Sun J., Shen Z. (2007). Effects of Cd stress on photosynthetic characteristics and nutrient uptake of cabbages with different Cd-tolerance. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao* 18:2605–2610
- Sterckeman T., Gossiaux L., Guimont S., Sirguy C., Lin Z. (2018a). Cadmium mass balance in French soils under annual crops: Scenarios for the next century. *Science of the Total Environment* 639 (2018) 1440–1452

- Sterckeman T., Gossiaux L., Guimont S., Sirguy C., Lin Z. (2018b). Corrigendum to “Cadmium mass balance in French soils under annual crops: Scenarios for the next century” [Sci. Total Environ. 639 (2018) 1440–1452]
- Thomas R., Meybeck M. (1992). The use of particulate material. Water Quality Assessments. D.E. Chapman. London, Chapman & Hall Ltd: 212-270.
- Toppi L., Vurro E., De Benedictis M., Falasca G., Zanella L., Musetti R., Lenucci M.S., Dalessandro G., Altamura M.M. (2012). A bifasic response to cadmium stress in carrot: Early acclimatory mechanisms give way to root collapse further to prolonged metal exposure. Plant Physiol Biochem 58:269–279
- Tóth, G., Hermann, T., Szatmári, G., & Pásztor, L. (2016). Maps of heavy metals in the soils of the European Union and proposed priority areas for detailed assessment. Science of The Total Environment, 565, 1054-1062.
- Tremel-Schaub A. et Feix I., (2005). Contamination des sols : transfert des sols vers les plantes. EDP Sciences
- WHO (2013). Reliable evaluation of low-level contamination of food. Addendum of the report on GEMS/Food-EURO second workshop of the 26-27th May 1995.
- Wolf Environnement S, SAS. (2001). Bilan entre micropolluants organiques, éléments traces métalliques, paramètres agronomiques, pH et matière sèche des boues de station d'épuration d'effluents urbains (données de Janvier 1998 à avril 2000). In: 2001. CA-j, editor, 2001.
- Wu C., Liao B., Wang S-L., Zhang J., Li J-T. (2010). Pb and Zn accumulation in a Cd-hyperaccumulator (*Viola baoshanensis*). Int J Phytorem 12:574–585
- Wu J., Dumat C., Lu H., Li Y., Li H., Xiao Y., Zhuang P., Li Z. (2016). Synergistic improvement of crop physiological status by combination of cadmium immobilization and micronutrient fertilization. ESPR
- Xiao X., Luo S., Zeng G., Wei W., Wan Y., Chen L., Guo H., Cao Z., Yang L., Chen J., et al (2010). Biosorption of cadmium by endophytic fungus (*EF*) *Microsphaeropsis* sp. LSE10 isolated from cadmium hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. Bioresour Technol 101:1668–1674
- Xin J., Huang B., Yang Z., Yuan J., Zhang Y. (2013). Comparison of cadmium subcellular distribution in different organs of two water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk.) cultivars. Plant Soil 372:431–444
- Xiong T., Leveque T., Shahid M., Foucault Y., Mombo S., Dumat C. (2014a). Lead and cadmium phytoavailability and human bioaccessibility for vegetables exposed to soil or atmospheric pollution by process ultrafine particles. J Environ Qual doi:10.2134/jeq2013.11.0469.
- Xiong T-T., Leveque T., Austruy A., Goix S., Schreck E., Dappe V., Sobanska S., Foucault Y., Dumat C. (2014b). Foliar uptake and metal(loid) bioaccessibility in vegetables exposed to particulate matter. Environ Geochem Health. doi:10.1007/s10653-014-9607-6
- Zhou H., Zeng M., Zhou X., Liao BH., Peng PQ., Hu M., Zhu W., Wu YJ., Zou ZJ. (2015). Heavy metal translocation and accumulation in iron plaques and plant tissues for 32 hybrid rice (*Oryza sativa* L.) cultivars. Plant Soil 386:317–329

4.2 Normes

NF X 50-110 (mai 2003) Qualité en expertise – Prescriptions générales de compétence pour une expertise. AFNOR (indice de classement X 50-110).

AFNOR. (2001) Norme Française NF U44-001 Amendements minéraux basiques - Dénomination et spécifications.

AFNOR. (2002) Norme Française NF U44-095 Amendements organiques - composts contenant des matières d'intérêt agronomique, issues du traitement des eaux.

AFNOR. (2006) Norme Française NF U44-051 Amendements organiques – Dénomination, spécifications et marquage.

AFNOR. (2008) Norme Française NF U44-551/A3 Support de cultures– Dénomination, spécifications et marquage.

AFNOR. (2011) Norme Française NF U42-001-1 Engrais minéraux - Dénomination et spécifications.

4.3 Législation et réglementation

Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées (JO du 31 janvier 1998)

Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique

Arrêté du 13 juin 2017 approuvant un cahier des charges pour la mise sur le marché et l'utilisation de digestats de méthanisation agricoles en tant que matières fertilisantes

Commission Européenne. (2008). Directive 2008/105/CE du parlement européen et du conseil du 16 décembre 2008 établissant des normes de qualité environnementale dans le domaine de l'eau, modifiant et abrogeant les directives du Conseil 82/176/CEE, 83/513/CEE, 84/156/CEE, 84/491/CEE, 86/280/CEE et modifiant la directive 2000/60/CE.

Directive 91/676/CEE du Conseil, du 12 décembre 1991, concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles » sur EUR-Lex, Journal officiel n° L 375 du 31/12/1991 p. 0001 - 0008 (consulté le 3 mai 2018)

Règlement (CE) N°1881/2006 de la commission du 19 décembre 2006 portant fixation de teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires

Règlement (CE) n°2003/2003 du parlement européen et du conseil du 13 octobre 2003 relatif aux engrais

ANNEXES

Annexe 1 : Lettre de saisine

2015 -SA- 0 1 4 0



COURRIER ARRIVE

22 JUIN 2015

DIRECTION GENERALE

Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie
Ministère des affaires sociales, de la santé et des droits des femmes
Ministère du travail, de l'emploi, de la formation professionnelle et du dialogue social
Ministère de l'agriculture, de l'agro-alimentaire et de la forêt
Ministère de l'économie, de l'industrie et du numérique

N° 113

Paris le 27 AVR. 2015

Le Directeur général de la santé

La Directrice générale de la prévention des risques

Le Directeur général du travail

Le Directeur général de l'alimentation

La Directrice générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des fraudes

à

Monsieur le Directeur général
de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de
l'alimentation, de l'environnement et du travail
14, rue Pierre et Marie Curie
94701 MAISONS-ALFORT Cedex

Objet : Exposition au cadmium – Propositions de valeurs toxicologiques de référence par ingestion, de valeurs sanitaires repères dans les milieux biologiques (sang, urines, ...) et de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes et supports de culture permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles et la contamination des productions végétales.

Le cadmium est un métal lourd ubiquitaire qui se retrouve dans les différents compartiments de l'environnement (sols, eau, air) du fait de sa présence à l'état naturel dans la croûte terrestre et des apports anthropiques liés aux activités industrielles et aux pratiques agricoles. Le cadmium pénètre facilement dans les végétaux par leurs racines et il entre ainsi dans la chaîne alimentaire.

Chez l'homme, une exposition prolongée au cadmium par voie orale induit une atteinte tubulaire rénale mise en évidence par une micro-protéinurie. Une fragilité osseuse, des troubles de la reproduction ont également été rapportés, ainsi qu'un risque accru de cancer ayant donné lieu à un classement comme « cancérogène pour l'homme » (groupe 1) par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC) en 1993 et dans la catégorie 2¹ par l'Union Européenne en 2004.

Selon l'avis et le rapport de l'Anses sur la deuxième étude de l'alimentation totale (EAT2) de juin 2011, la source principale d'exposition de la population générale au cadmium est l'alimentation. L'exposition alimentaire des français par le cadmium semble en augmentation importante (+ 400 %) par rapport à l'étude précédente EAT1 parue en 2004. Un dépassement de la valeur toxicologique de référence (VTR) définie par l'EFSA en 2009 est constaté chez 0,6% des adultes et 15% des enfants. L'agence nationale s'est autosaisie sur les suites à donner à cette deuxième EAT, en

¹ Correspondant à la catégorie 1B actuelle définie par le règlement (CE) N° 1272/2008 : substance présumée cancérogène chez l'être humain

particulier sur le cadmium, pour lequel il s'agit d'identifier l'origine de la forte augmentation des estimations entre les deux études.

La pollution d'origine industrielle peut sensiblement augmenter l'exposition au cadmium des populations riveraines. Pour mener les évaluations des risques sanitaires dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués, le choix des VTR est défini par la note d'information DGS/EA1/DGPR/2014/307 du 31 octobre 2014 relative aux modalités de sélection des substances chimiques et de choix des valeurs toxicologiques de référence. La VTR utilisée doit ainsi être publiée dans l'une des 8 bases de données (Anses, US-EPA, ATSDR, OMS/IPCS, Santé Canada, RIVM, OEHHA ou EFSA). Il est recommandé de sélectionner en premier lieu les VTR construites par l'Anses ou, à défaut, les VTR qu'elle a sélectionnées parmi les VTR disponibles dans ces bases de données. A ce propos, le Comité mixte d'experts FAO/OMS sur les additifs alimentaires et les contaminants (JECFA) a, en 2010, fixé comme VTR par ingestion, la dose mensuelle tolérable provisoire (DMTP) de $25 \mu\text{g.kg}^{-1}$ de poids corporel. En 2011, l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) a reconduit comme VTR par ingestion la dose hebdomadaire tolérable de $2,5 \mu\text{g.kg}^{-1}$ de poids corporel, qu'elle avait établie en 2009. La VTR à utiliser dans le cadre de la gestion des sites et sols pollués par du cadmium n'a, à ce jour, pas été définie au niveau national.

En outre, l'action 24 du Plan National Santé Environnement 3 (PNSE3) prévoit d'évaluer la pertinence et la faisabilité d'actions de dépistage ou de surveillance des imprégnations des populations exposées aux métaux tels que le cadmium sur les sites concernés prioritaires, de les mettre en œuvre le cas échéant et de diffuser des informations de prévention en fonction des résultats. Au niveau national, il n'a toutefois pas été fixé de valeurs sanitaires repères dans les milieux biologiques pour un dépistage.

Cependant, diverses valeurs sanitaires repères ont, d'une part, été utilisées dans le cadre d'études menées par l'InVS et, d'autre part, recommandées par des organismes sanitaires européens et internationaux. Dans l'étude relative à l'évaluation de l'exposition à des sols pollués au plomb, au cadmium et à l'arsenic en Aveyron (InVS, 2008), les valeurs sanitaires repères du cadmium pour un dépistage ont été définies par des concentrations urinaires supérieures à la valeur de $2 \mu\text{g}$ de cadmium. g^{-1} de créatinine chez les adultes, et de $1 \mu\text{g}$ de cadmium. g^{-1} de créatinine chez les enfants. En 2011, l'InVS a publié les résultats de l'étude d'imprégnation de la population adulte française en divers polluants de l'environnement dont le cadmium (étude nationale nutrition santé ENNS 2006-2007). L'InVS soulignait que le JECFA recommandait que la cadmiurie ne dépasse pas la valeur de $2,5 \mu\text{g.g}^{-1}$ de créatinine ; le Comité scientifique sur la toxicité, l'écotoxicité et l'environnement (CSTEE-2004) recommandait que la cadmiurie ne dépasse pas la valeur $2 \mu\text{g.g}^{-1}$ de créatinine. En 2009, l'EFSA recommandait une valeur de cadmiurie inférieure à $1 \mu\text{g.g}^{-1}$ créatinine.

Enfin, dans son avis de novembre 2011 relatif à la révision des teneurs maximales en cadmium des denrées alimentaires destinées à l'homme, l'Anses recommande, afin de réduire l'exposition de la population, d'agir sur le niveau de contamination des sources environnementales, en particulier au niveau des intrants (engrais contaminés, épandage des boues de station d'épuration, ...) à l'origine de la contamination des sols et des aliments.

Au niveau européen, les engrais inorganiques sont régis par le règlement (CE) n° 2003/2003 du Parlement européen et du Conseil du 13 octobre 2003, modifié par le règlement (UE) n° 463/2013 de la Commission du 17 mai 2013. Un projet de nouveau règlement est en cours d'élaboration, élargi à l'ensemble des matières fertilisantes (engrais minéraux et organiques, amendements minéraux et organiques (carbonates, dolomie, composts, lisiers, ...), supports de cultures, ...) incluant la fixation de valeurs limites en contaminants. La fixation de telles valeurs concernera donc le cadmium dans l'ensemble des matières fertilisantes et supports de culture. Dans ce contexte, la France soutient la récente proposition de la Commission européenne de soumettre au Comité Scientifique des Risques Sanitaires et Environnementaux (SCHER) l'étude de 2013 de Fertilizer Europe² pour évaluation notamment en termes sanitaires. En effet, au vu de ces nouvelles données, il apparaît nécessaire de mettre à jour l'analyse³ du Comité scientifique sur la toxicité, l'écotoxicité et l'environnement (CSTEE devenu le SCHER) datant de 2002.

² Revisiting and updating the effect of phosphate fertilizers to cadmium accumulation in European agricultural soils.

³ Member State assessments of the risk to health and the environment from cadmium in fertilizers.

Au regard de ces éléments, nous souhaitons donc recueillir votre avis, sur les questions suivantes :

- 1- Pour les populations riveraines de sites pollués susceptibles d'être surexposées au cadmium :
 - quelles valeurs toxicologiques de référence par ingestion (adultes, enfants, ...) faut-il retenir dans le cadre de la réalisation des évaluations quantitatives des risques sanitaires ?
 - quelles valeurs sanitaires repères du cadmium faut-il retenir dans les milieux biologiques (sang, urine, ...), selon l'âge, dans le cadre de la prise en charge sanitaire ?
- 2- Pour les populations de travailleurs en contact avec des matières fertilisantes, des produits ou procédés impliquant du cadmium, ou intervenant sur des sites pollués, et à la lumière des informations qui pourraient être obtenues dans le cadre de la saisine adressée à l'InVS sur le même sujet :
 - les risques liés à l'exposition au cadmium dans ces contextes professionnels sont-ils bien évalués aux titres des réglementations santé et sécurité au travail (à l'aide d'une enquête de filière par exemple) ?
 - quels sont les niveaux de contamination qui pourraient être estimés selon les activités ou situations professionnelles ?
 - quelles conclusions peuvent en être tirées en comparaison des valeurs limites d'exposition professionnelle (VLEP) et des valeurs limites biologiques (notamment celles recommandées par l'Anses) ?
- 3- Dans l'ensemble des matières fertilisantes et supports de culture, quels seraient les niveaux en cadmium permettant, en prenant en compte les travaux européens susmentionnés et la spécificité de ces produits, de maîtriser la pollution des sols agricoles et la contamination des productions végétales ?

Votre avis sur les valeurs sanitaires repères du cadmium dans les milieux biologiques sera établi en lien avec l'InVS, en copie de cette saisine.

Nous saisissons parallèlement l'Institut de veille sanitaire concernant, d'une part, la communication des résultats de l'enquête d'imprégnation par le cadmium chez l'enfant de 6 mois à 6 ans et, d'autre part, l'établissement de valeurs de référence du cadmium dans les milieux biologiques (sang, urine...).

Nous vous remercions de bien vouloir nous transmettre le rapport final concernant le point 1 de cette saisine dans le délai de six mois. Le rapport final concernant les points 2 et 3 sera transmis dans le délai de 18 mois.

Le Directeur général de la santé

Benoît VALLET

Le Directeur général du travail

Yves STRUILLLOU

La Directrice générale
de la concurrence, de la consommation
et de la répression des fraudes

Nathalie HOMOBOONO

La Directrice générale de la prévention
des risques

Patricia BLANC

Le Directeur général de l'alimentation

Patrick DEHAUMONT

Copie : Monsieur le directeur général de l'InVS

Annexe 2 : Présentation des scénarios d'itinéraires de fertilisation liés aux flux entrants relatifs à l'emploi d'engrais phosphatés testés dans le modèle

N° scénario	Pratique culturale	Dose d'apport de l'engrais phosphaté (kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹)	Teneur en Cd testée dans l'engrais phosphaté (mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹)
1	Monoculture blé	80	90
2	Monoculture blé	80	60
3	Monoculture blé	80	40
4	Monoculture blé	80	20
5	Monoculture blé	100 avec un temps d'impasse de 2 ans	90
6	Monoculture blé	100 avec un temps d'impasse de 2 ans	60
7	Monoculture blé	100 avec un temps d'impasse de 2 ans	40
8	Monoculture blé	100 avec un temps d'impasse de 2 ans	20
9	Rotation Pomme de terre/blé/blé	100	90
10	Rotation Pomme de terre/blé/blé	100	60
11	Rotation Pomme de terre/blé/blé	100	40
12	Rotation Pomme de terre/blé/blé	100	20
13	Rotation Pomme de terre/blé/blé	180 avec un temps d'impasse de 2 ans	90
14	Rotation Pomme de terre/blé/blé	180 avec un temps d'impasse de 2 ans	60
15	Rotation Pomme de terre/blé/blé	180 avec un temps d'impasse de 2 ans	40
16	Rotation Pomme de terre/blé/blé	180 avec un temps d'impasse de 2 ans	20

N° scénario	Pratique culturale	Dose d'apport de l'engrais phosphaté (kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹)	Teneur en Cd testée dans l'engrais phosphaté (mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹)
17	Monoculture blé	80	60 sur les trois premières années d'apport → 40 pendant 12 ans → 20 (en accord avec le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE)
18	Monoculture blé	100 avec un temps d'impasse de 2 ans	60 sur les trois premières années d'apport → 40 pendant 12 ans → 20 (en accord avec le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE)
19	Rotation Pomme de terre/blé/blé	100	60 sur les trois premières années d'apport → 40 pendant 12 ans → 20 (en accord avec le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE)
20	Rotation Pomme de terre/blé/blé	180 avec un temps d'impasse de 2 ans	60 sur les trois premières années d'apport → 40 pendant 12 ans → 20 (en accord avec le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE)

Annexe 3 : Distribution et moyenne des concentrations en Cd modélisées dans les matrices sol-culture (pommes de terre, blé (grain)) – lixivié en fonction de l'itinéraire de fertilisation et des teneurs en Cd testées dans l'engrais minéral phosphaté

3.1 Résultats obtenus à l'issue de la modélisation liée à un itinéraire monoculture blé avec un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ en fonction de la teneur en Cd testée dans l'intrant (scénarios 1 à 4) et du temps de projection de la simulation

3.1.1 Scénario 1 : [Cd] engrais phosphaté = 90 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.1.1-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et une teneur en Cd de 90 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.304	0.305	0.308	0.309	0.316	0.317	0.322	0.323	0.328	0.331	0.352	0.353	0.374	0.375	0.395	0.397	0.412	0.414
Min	0.011	0.012	0.015	0.016	0.021	0.022	0.027	0.028	0.032	0.034	0.052	0.053	0.070	0.071	0.076	0.076	0.077	0.076
P025	0.070	0.071	0.074	0.076	0.082	0.084	0.089	0.090	0.095	0.097	0.115	0.116	0.132	0.133	0.145	0.146	0.154	0.155
P05	0.084	0.086	0.089	0.090	0.098	0.099	0.104	0.105	0.110	0.112	0.131	0.132	0.149	0.150	0.162	0.163	0.173	0.174
P10	0.106	0.107	0.110	0.111	0.118	0.120	0.125	0.126	0.131	0.133	0.152	0.153	0.170	0.170	0.184	0.186	0.195	0.196
P25	0.143	0.145	0.148	0.149	0.156	0.157	0.162	0.164	0.168	0.170	0.190	0.191	0.209	0.210	0.226	0.227	0.238	0.239
P50	0.209	0.211	0.214	0.215	0.221	0.222	0.228	0.229	0.235	0.237	0.261	0.263	0.285	0.286	0.307	0.309	0.324	0.326
P75	0.343	0.344	0.347	0.348	0.356	0.357	0.361	0.362	0.368	0.370	0.395	0.396	0.423	0.425	0.450	0.453	0.473	0.476
P90	0.571	0.572	0.574	0.575	0.580	0.581	0.585	0.586	0.593	0.596	0.625	0.626	0.661	0.664	0.693	0.696	0.719	0.722
P95	0.846	0.847	0.850	0.851	0.856	0.857	0.863	0.864	0.869	0.871	0.889	0.890	0.904	0.905	0.924	0.929	0.948	0.950
P975	1.101	1.102	1.102	1.102	1.102	1.102	1.103	1.103	1.104	1.104	1.109	1.109	1.114	1.115	1.141	1.144	1.171	1.173
P99	1.441	1.442	1.443	1.444	1.448	1.449	1.454	1.455	1.453	1.455	1.474	1.475	1.476	1.477	1.490	1.492	1.502	1.503
Max	5.533	5.524	5.509	5.501	5.464	5.456	5.425	5.417	5.390	5.366	5.233	5.224	5.106	5.099	4.966	4.955	4.857	4.845

❖ Matrice culture (grain de blé)

Tableau 3.1.1-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice culture (grain de blé) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et une teneur en Cd de 90 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.0913	0.0917	0.0926	0.0930	0.0951	0.0955	0.0971	0.0975	0.0991	0.0999	0.1067	0.1071	0.1137	0.1140	0.1201	0.1207	0.1252	0.1258
Min	0.0047	0.0052	0.0062	0.0067	0.0092	0.0097	0.0117	0.0119	0.0126	0.0129	0.0161	0.0163	0.0196	0.0198	0.0231	0.0234	0.0260	0.0264
P025	0.0231	0.0237	0.0247	0.0252	0.0271	0.0274	0.0284	0.0287	0.0301	0.0307	0.0363	0.0368	0.0421	0.0423	0.0474	0.0479	0.0516	0.0522
P05	0.0296	0.0300	0.0310	0.0314	0.0333	0.0337	0.0350	0.0354	0.0370	0.0375	0.0437	0.0440	0.0496	0.0499	0.0553	0.0560	0.0598	0.0602
P10	0.0354	0.0358	0.0368	0.0372	0.0397	0.0402	0.0420	0.0424	0.0441	0.0449	0.0517	0.0521	0.0584	0.0587	0.0647	0.0652	0.0697	0.0703
P25	0.0500	0.0506	0.0517	0.0521	0.0545	0.0550	0.0568	0.0573	0.0591	0.0600	0.0678	0.0682	0.0753	0.0757	0.0819	0.0826	0.0875	0.0881
P50	0.0711	0.0716	0.0726	0.0732	0.0755	0.0759	0.0778	0.0782	0.0801	0.0809	0.0888	0.0891	0.0965	0.0968	0.1040	0.1047	0.1097	0.1104
P75	0.1005	0.1009	0.1018	0.1023	0.1044	0.1048	0.1067	0.1072	0.1088	0.1095	0.1177	0.1182	0.1254	0.1259	0.1328	0.1335	0.1388	0.1396
P90	0.1518	0.1520	0.1525	0.1528	0.1546	0.1549	0.1561	0.1565	0.1585	0.1597	0.1656	0.1661	0.1722	0.1726	0.1790	0.1797	0.1841	0.1848
P95	0.1996	0.1999	0.2005	0.2007	0.2024	0.2020	0.2030	0.2029	0.2035	0.2043	0.2097	0.2098	0.2144	0.2148	0.2193	0.2200	0.2253	0.2257
P975	0.2990	0.2992	0.2993	0.2992	0.2966	0.2969	0.2973	0.2973	0.2980	0.2983	0.3019	0.3024	0.3074	0.3075	0.3127	0.3118	0.3129	0.3132
P99	0.4811	0.4810	0.4805	0.4804	0.4795	0.4793	0.4781	0.4775	0.4716	0.4707	0.4570	0.4570	0.4516	0.4502	0.4323	0.4306	0.4174	0.4157
Max	2.4683	2.4644	2.4575	2.4537	2.4364	2.4329	2.4184	2.4145	2.4020	2.3911	2.3296	2.3252	2.2705	2.2676	2.2062	2.2007	2.1555	2.1503

❖ Matrice lixiviat

Tableau 3.1.1-3. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.ha⁻¹) modélisées dans la matrice lixiviat le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et une teneur en Cd de 90 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2158	2193	2209	2210	2277	2287	2312	2324	2366	2395	2571	2576	2748	2752	2906	2913	3005	3019
Min	98	85	90	81	103	83	124	127	108	98	126	162	215	180	215	189	257	175
P025	340	329	347	339	363	365	381	378	387	398	455	458	511	509	563	561	609	603
P05	428	426	433	430	456	463	480	480	494	501	563	563	629	616	689	684	734	737
P10	570	571	587	581	599	611	627	636	651	650	727	736	799	797	856	861	929	928
P25	934	945	954	963	980	993	1015	1043	1053	1055	1176	1172	1267	1282	1366	1372	1439	1453
P50	1581	1599	1618	1645	1698	1707	1768	1771	1816	1842	2031	2045	2232	2224	2404	2414	2550	2582
P75	2671	2701	2741	2746	2836	2844	2885	2908	2985	3040	3304	3315	3611	3603	3852	3835	3981	3995
P90	4131	4148	4249	4242	4388	4342	4412	4464	4459	4596	4873	4884	5180	5139	5408	5407	5537	5559
P95	5405	5549	5500	5547	5777	5627	5692	5660	5741	5765	6069	6082	6462	6351	6630	6571	6607	6626
P975	7040	7396	7216	7161	7314	7320	7421	7233	7355	7357	7531	7531	7853	7637	7992	8076	7975	7876
P99	10742	11017	10617	10361	10537	11097	10636	10675	10708	11086	10368	10109	9928	10124	10300	10057	10300	10063
Max	47791	64302	62620	72586	48624	66892	49029	48278	81533	43428	45261	54386	47411	38422	56253	37852	44420	38297

3.1.2 Scénario 2 : [Cd] engrais phosphatée = 60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.1.2-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et une teneur en Cd de 60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.311	0.311	0.313	0.313	0.316	0.317	0.319	0.320	0.322	0.324	0.334	0.335	0.346	0.346	0.356	0.357	0.365	0.366
Min	0.011	0.012	0.014	0.015	0.020	0.021	0.025	0.026	0.030	0.032	0.048	0.049	0.051	0.049	0.049	0.048	0.054	0.054
P025	0.071	0.072	0.073	0.074	0.078	0.079	0.082	0.083	0.086	0.087	0.099	0.099	0.108	0.109	0.115	0.116	0.120	0.121
P05	0.086	0.086	0.088	0.089	0.093	0.094	0.097	0.098	0.100	0.102	0.113	0.113	0.123	0.124	0.131	0.132	0.136	0.137
P10	0.108	0.108	0.110	0.111	0.114	0.115	0.118	0.119	0.121	0.123	0.133	0.133	0.142	0.143	0.151	0.151	0.156	0.156
P25	0.145	0.146	0.148	0.148	0.151	0.152	0.155	0.155	0.157	0.159	0.168	0.169	0.178	0.179	0.187	0.188	0.194	0.194
P50	0.215	0.216	0.217	0.218	0.221	0.222	0.225	0.226	0.229	0.231	0.246	0.247	0.259	0.259	0.270	0.271	0.280	0.281
P75	0.351	0.352	0.353	0.353	0.357	0.357	0.361	0.361	0.365	0.366	0.380	0.381	0.396	0.397	0.410	0.412	0.423	0.424
P90	0.579	0.580	0.580	0.581	0.588	0.589	0.595	0.597	0.602	0.605	0.618	0.619	0.635	0.636	0.654	0.656	0.665	0.666
P95	0.850	0.851	0.851	0.851	0.853	0.854	0.857	0.858	0.860	0.860	0.868	0.868	0.869	0.869	0.872	0.873	0.879	0.881
P975	1.101	1.100	1.098	1.096	1.090	1.089	1.085	1.083	1.080	1.081	1.076	1.077	1.080	1.080	1.085	1.086	1.089	1.089
P99	1.571	1.570	1.568	1.566	1.558	1.556	1.552	1.550	1.545	1.541	1.518	1.516	1.480	1.480	1.465	1.466	1.467	1.465
Max	5.534	5.519	5.498	5.487	5.441	5.430	5.394	5.385	5.341	5.326	5.164	5.154	4.996	4.988	4.813	4.796	4.679	4.657

❖ Matrice culture (grain de blé)

Tableau 3.1.2-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg^{-1}) modélisées dans la matrice culture (grain de blé) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ et une teneur en Cd de $60 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.0920	0.0922	0.0925	0.0927	0.0936	0.0938	0.0945	0.0947	0.0953	0.0957	0.0986	0.0988	0.1017	0.1019	0.1047	0.1049	0.1070	0.1073
Min	0.0047	0.0051	0.0060	0.0065	0.0087	0.0091	0.0109	0.0111	0.0116	0.0119	0.0141	0.0143	0.0164	0.0165	0.0186	0.0188	0.0205	0.0207
P025	0.0230	0.0234	0.0240	0.0243	0.0258	0.0260	0.0269	0.0271	0.0278	0.0282	0.0315	0.0316	0.0350	0.0351	0.0386	0.0389	0.0411	0.0414
P05	0.0291	0.0294	0.0299	0.0301	0.0316	0.0318	0.0327	0.0329	0.0339	0.0344	0.0383	0.0385	0.0423	0.0424	0.0458	0.0461	0.0488	0.0491
P10	0.0351	0.0354	0.0361	0.0364	0.0378	0.0381	0.0394	0.0396	0.0407	0.0412	0.0452	0.0455	0.0496	0.0498	0.0536	0.0540	0.0567	0.0571
P25	0.0512	0.0514	0.0518	0.0521	0.0533	0.0536	0.0547	0.0549	0.0558	0.0563	0.0605	0.0607	0.0646	0.0648	0.0687	0.0691	0.0718	0.0722
P50	0.0713	0.0716	0.0721	0.0723	0.0734	0.0737	0.0746	0.0748	0.0756	0.0760	0.0799	0.0802	0.0844	0.0847	0.0883	0.0886	0.0910	0.0913
P75	0.1020	0.1021	0.1024	0.1025	0.1030	0.1031	0.1034	0.1035	0.1041	0.1044	0.1072	0.1074	0.1104	0.1106	0.1134	0.1139	0.1166	0.1169
P90	0.1544	0.1546	0.1546	0.1546	0.1550	0.1552	0.1554	0.1550	0.1549	0.1545	0.1557	0.1559	0.1579	0.1581	0.1605	0.1605	0.1615	0.1617
P95	0.2032	0.2033	0.2033	0.2025	0.2007	0.2008	0.2009	0.2008	0.2013	0.2011	0.2014	0.2015	0.2015	0.2015	0.2025	0.2028	0.2030	0.2028
P975	0.3057	0.3039	0.3008	0.3007	0.3009	0.3010	0.3012	0.3013	0.3015	0.3016	0.3025	0.3026	0.3010	0.3012	0.3002	0.3003	0.2997	0.2995
P99	0.5012	0.5011	0.5009	0.5008	0.5002	0.5000	0.4963	0.4952	0.4867	0.4833	0.4676	0.4673	0.4608	0.4607	0.4542	0.4535	0.4435	0.4429
Max	2.4692	2.4618	2.4521	2.4471	2.4258	2.4205	2.4038	2.3997	2.3795	2.3726	2.2976	2.2927	2.2196	2.2161	2.1353	2.1274	2.0737	2.0636

❖ Matrice lixiviat

Tableau 3.1.2-3. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.ha^{-1}) modélisées dans la matrice lixiviat le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ et une teneur en Cd de $60 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2153	2152	2160	2159	2201	2182	2208	2222	2231	2220	2292	2304	2356	2349	2434	2429	2488	2484
Min	95	91	100	90	80	92	107	118	76	89	125	104	93	153	143	147	158	151
P025	324	317	322	325	338	342	354	360	367	376	406	412	444	440	483	486	500	518
P05	401	410	422	414	431	435	448	448	458	470	504	507	546	553	588	591	606	611
P10	545	554	562	561	578	578	589	601	601	606	646	648	706	695	746	735	780	779
P25	901	901	905	919	944	927	961	954	968	980	1034	1047	1102	1098	1162	1146	1205	1210
P50	1572	1551	1580	1565	1627	1616	1642	1659	1682	1689	1787	1810	1902	1906	2001	2024	2075	2104
P75	2659	2663	2689	2687	2742	2727	2785	2785	2804	2820	2941	2949	3062	3059	3173	3186	3257	3266
P90	4161	4167	4145	4151	4159	4203	4190	4263	4256	4242	4308	4301	4376	4321	4458	4428	4502	4487
P95	5559	5504	5531	5537	5578	5468	5537	5632	5534	5438	5406	5408	5430	5378	5483	5425	5496	5442
P975	7404	7356	7292	7362	7602	7351	7174	7327	7077	7083	6791	6833	6818	6756	6818	6672	6750	6542
P99	10668	10865	11047	10504	10847	10335	10598	10702	10078	10381	10163	10320	9246	9542	9210	8909	8673	8703
Max	49218	49398	44343	52743	55996	80309	74540	76246	41749	32608	41460	41313	35925	40040	45737	37120	55089	35523

3.1.3 Scénario 3 : [Cd] engrais phosphatée = 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.1.3-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et une teneur en Cd de 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.312	0.313	0.313	0.313	0.314	0.314	0.315	0.315	0.316	0.317	0.320	0.320	0.324	0.324	0.328	0.328	0.331	0.332
Min	0.011	0.011	0.012	0.013	0.015	0.016	0.018	0.018	0.020	0.021	0.030	0.030	0.038	0.039	0.045	0.045	0.042	0.043
P025	0.069	0.070	0.071	0.072	0.074	0.074	0.076	0.076	0.078	0.079	0.085	0.086	0.089	0.089	0.093	0.093	0.094	0.094
P05	0.085	0.085	0.086	0.087	0.089	0.090	0.092	0.092	0.093	0.094	0.099	0.100	0.105	0.105	0.108	0.109	0.111	0.111
P10	0.107	0.107	0.107	0.108	0.110	0.110	0.111	0.112	0.113	0.114	0.119	0.119	0.123	0.123	0.126	0.126	0.128	0.128
P25	0.143	0.143	0.144	0.144	0.146	0.146	0.147	0.147	0.148	0.148	0.153	0.153	0.157	0.157	0.160	0.160	0.162	0.162
P50	0.212	0.212	0.213	0.213	0.215	0.215	0.216	0.217	0.218	0.219	0.224	0.225	0.231	0.231	0.236	0.237	0.239	0.240
P75	0.346	0.346	0.346	0.346	0.347	0.347	0.347	0.347	0.348	0.349	0.354	0.354	0.364	0.364	0.371	0.372	0.377	0.378
P90	0.611	0.612	0.613	0.613	0.616	0.616	0.618	0.618	0.619	0.621	0.618	0.618	0.623	0.623	0.629	0.628	0.633	0.633
P95	0.860	0.860	0.861	0.861	0.861	0.861	0.862	0.862	0.862	0.862	0.864	0.863	0.864	0.863	0.861	0.862	0.860	0.860
P975	1.141	1.140	1.140	1.139	1.137	1.136	1.135	1.135	1.133	1.133	1.126	1.126	1.118	1.118	1.106	1.104	1.097	1.091
P99	1.721	1.720	1.720	1.720	1.718	1.717	1.684	1.674	1.643	1.624	1.538	1.535	1.506	1.501	1.470	1.467	1.432	1.430
Max	5.531	5.523	5.504	5.496	5.450	5.443	5.405	5.397	5.359	5.342	5.203	5.194	5.048	5.040	4.890	4.871	4.759	4.744

❖ Matrice culture (grain de blé)

Tableau 3.1.3-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice culture (grain de blé) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et une teneur en Cd de 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.0927	0.0927	0.0927	0.0928	0.0929	0.0929	0.0930	0.0931	0.0932	0.0932	0.0938	0.0938	0.0944	0.0944	0.0950	0.0951	0.0956	0.0957
Min	0.0044	0.0047	0.0051	0.0054	0.0065	0.0067	0.0077	0.0079	0.0087	0.0091	0.0128	0.0129	0.0145	0.0146	0.0161	0.0162	0.0174	0.0176
P025	0.0226	0.0228	0.0231	0.0234	0.0244	0.0245	0.0251	0.0253	0.0258	0.0261	0.0284	0.0285	0.0304	0.0305	0.0326	0.0328	0.0344	0.0346
P05	0.0290	0.0291	0.0294	0.0295	0.0302	0.0304	0.0309	0.0311	0.0317	0.0320	0.0344	0.0345	0.0369	0.0369	0.0390	0.0392	0.0408	0.0410
P10	0.0349	0.0352	0.0356	0.0357	0.0365	0.0367	0.0373	0.0374	0.0380	0.0382	0.0409	0.0410	0.0435	0.0436	0.0460	0.0462	0.0477	0.0480
P25	0.0500	0.0501	0.0505	0.0506	0.0512	0.0514	0.0518	0.0520	0.0525	0.0528	0.0547	0.0548	0.0569	0.0569	0.0587	0.0589	0.0602	0.0603
P50	0.0703	0.0704	0.0706	0.0707	0.0711	0.0712	0.0715	0.0715	0.0718	0.0719	0.0730	0.0731	0.0746	0.0747	0.0761	0.0762	0.0774	0.0776
P75	0.1004	0.1004	0.1006	0.1004	0.1003	0.1003	0.1004	0.1004	0.1003	0.1003	0.0999	0.0998	0.0997	0.0997	0.1003	0.1004	0.1008	0.1008
P90	0.1584	0.1583	0.1584	0.1584	0.1570	0.1568	0.1562	0.1557	0.1546	0.1544	0.1523	0.1523	0.1523	0.1522	0.1511	0.1512	0.1509	0.1509
P95	0.2037	0.2037	0.2037	0.2035	0.2034	0.2034	0.2034	0.2032	0.2017	0.2013	0.1986	0.1984	0.1967	0.1965	0.1954	0.1954	0.1943	0.1942
P975	0.3092	0.3091	0.3090	0.3090	0.3087	0.3087	0.3084	0.3083	0.3082	0.3082	0.3053	0.3050	0.2992	0.2991	0.2931	0.2923	0.2913	0.2908
P99	0.5126	0.5109	0.5074	0.5064	0.5007	0.4997	0.4967	0.4955	0.4893	0.4863	0.4650	0.4646	0.4553	0.4548	0.4364	0.4354	0.4267	0.4251
Max	2.4677	2.4638	2.4552	2.4515	2.4300	2.4265	2.4091	2.4052	2.3879	2.3800	2.3154	2.3114	2.2438	2.2401	2.1709	2.1623	2.1106	2.1034

❖ Matrice lixiviat

Tableau 3.1.3-3. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.ha⁻¹) modélisées dans la matrice lixiviat le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et une teneur en Cd de 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2168	2168	2158	2166	2158	2148	2149	2143	2160	2165	2151	2149	2141	2160	2165	2160	2155	2174
Min	63	58	80	70	106	85	112	73	72	90	132	123	117	115	153	116	110	168
P025	327	320	334	327	337	350	357	351	356	358	390	391	415	411	424	435	450	447
P05	416	407	417	425	423	435	445	439	439	452	473	483	513	511	529	538	552	553
P10	554	549	546	563	576	574	574	574	586	591	610	629	646	657	681	673	700	705
P25	895	901	912	912	926	926	928	934	955	951	987	987	1028	1039	1075	1066	1087	1094
P50	1561	1554	1566	1555	1575	1579	1583	1578	1615	1620	1668	1664	1717	1728	1782	1762	1802	1824
P75	2642	2632	2634	2640	2623	2627	2632	2640	2635	2681	2685	2647	2703	2708	2738	2707	2728	2738
P90	4111	4100	4138	4060	4035	4020	4058	4069	4003	4057	3924	3945	3830	3873	3805	3806	3755	3786
P95	5577	5521	5502	5501	5397	5229	5423	5264	5319	5330	4950	5037	4811	4869	4744	4743	4579	4799
P975	7582	7520	7067	7415	7092	7094	7140	7055	7145	7025	6634	6643	6359	6303	5928	6088	5776	6116
P99	12059	11892	11565	11934	11673	11410	11153	11182	11497	10887	10034	10097	9569	9949	8962	9274	8742	8519
Max	43469	73750	52641	62060	76559	62355	60986	49835	57934	47217	40642	73454	38035	38821	46741	48184	40657	48216

3.1.4 Scénario 4 : [Cd] engrais phosphatée = 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.1.4-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et une teneur en Cd de 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.312	0.312	0.312	0.311	0.310	0.310	0.309	0.309	0.308	0.307	0.304	0.304	0.300	0.300	0.297	0.297	0.295	0.295
Min	0.010	0.011	0.011	0.012	0.013	0.013	0.014	0.014	0.015	0.016	0.021	0.021	0.025	0.025	0.023	0.024	0.021	0.022
P025	0.070	0.070	0.070	0.070	0.071	0.072	0.072	0.072	0.072	0.073	0.072	0.072	0.071	0.070	0.069	0.068	0.067	0.067
P05	0.086	0.086	0.087	0.087	0.087	0.087	0.086	0.087	0.086	0.086	0.086	0.086	0.084	0.084	0.083	0.083	0.081	0.081
P10	0.108	0.108	0.107	0.107	0.106	0.106	0.106	0.106	0.105	0.105	0.104	0.104	0.102	0.102	0.100	0.099	0.097	0.097
P25	0.144	0.144	0.144	0.143	0.143	0.142	0.142	0.141	0.140	0.140	0.138	0.138	0.135	0.135	0.132	0.132	0.130	0.130
P50	0.216	0.216	0.215	0.215	0.214	0.214	0.214	0.214	0.214	0.214	0.213	0.212	0.211	0.211	0.209	0.209	0.208	0.207
P75	0.351	0.351	0.350	0.350	0.350	0.350	0.349	0.349	0.349	0.349	0.347	0.347	0.345	0.345	0.344	0.345	0.344	0.344
P90	0.604	0.604	0.603	0.603	0.603	0.603	0.603	0.603	0.603	0.603	0.602	0.602	0.595	0.594	0.583	0.583	0.582	0.582
P95	0.851	0.850	0.850	0.850	0.849	0.849	0.849	0.849	0.848	0.848	0.839	0.838	0.831	0.831	0.823	0.821	0.807	0.807
P975	1.141	1.140	1.137	1.136	1.131	1.130	1.126	1.125	1.120	1.117	1.074	1.072	1.045	1.044	1.034	1.034	1.023	1.020
P99	1.431	1.430	1.429	1.429	1.427	1.426	1.424	1.424	1.421	1.420	1.411	1.410	1.399	1.398	1.389	1.388	1.380	1.379
Max	5.531	5.523	5.504	5.498	5.455	5.447	5.415	5.407	5.377	5.364	5.222	5.214	5.084	5.074	4.924	4.910	4.811	4.796

❖ Matrice culture (grain de blé)

Tableau 3.1.4-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice culture (grain de blé) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et une teneur en Cd de 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.0929	0.0927	0.0924	0.0923	0.0916	0.0915	0.0910	0.0909	0.0904	0.0902	0.0882	0.0881	0.0863	0.0862	0.0847	0.0845	0.0834	0.0833
Min	0.0043	0.0044	0.0047	0.0048	0.0054	0.0056	0.0060	0.0061	0.0066	0.0068	0.0088	0.0089	0.0109	0.0110	0.0124	0.0125	0.0124	0.0125
P025	0.0227	0.0229	0.0230	0.0231	0.0234	0.0235	0.0239	0.0240	0.0243	0.0244	0.0250	0.0251	0.0258	0.0259	0.0266	0.0267	0.0269	0.0270
P05	0.0294	0.0295	0.0297	0.0298	0.0300	0.0300	0.0302	0.0303	0.0304	0.0305	0.0311	0.0311	0.0314	0.0314	0.0320	0.0321	0.0323	0.0324
P10	0.0358	0.0358	0.0359	0.0359	0.0360	0.0360	0.0362	0.0362	0.0363	0.0364	0.0370	0.0370	0.0374	0.0375	0.0377	0.0377	0.0377	0.0378
P25	0.0514	0.0514	0.0512	0.0512	0.0510	0.0510	0.0509	0.0509	0.0508	0.0507	0.0502	0.0502	0.0498	0.0497	0.0493	0.0493	0.0490	0.0489
P50	0.0708	0.0707	0.0706	0.0705	0.0700	0.0699	0.0696	0.0695	0.0690	0.0688	0.0676	0.0676	0.0667	0.0666	0.0657	0.0656	0.0648	0.0648
P75	0.1015	0.1013	0.1008	0.1007	0.0997	0.0995	0.0987	0.0985	0.0977	0.0975	0.0942	0.0941	0.0922	0.0921	0.0905	0.0904	0.0893	0.0891
P90	0.1555	0.1554	0.1553	0.1553	0.1530	0.1530	0.1512	0.1508	0.1490	0.1485	0.1450	0.1446	0.1420	0.1420	0.1397	0.1397	0.1384	0.1382
P95	0.2031	0.2031	0.2029	0.2028	0.2015	0.2013	0.1989	0.1986	0.1980	0.1977	0.1927	0.1921	0.1894	0.1892	0.1853	0.1849	0.1814	0.1811
P975	0.3092	0.3090	0.3087	0.3087	0.3080	0.3078	0.3073	0.3071	0.3066	0.3062	0.3005	0.3003	0.2935	0.2934	0.2849	0.2843	0.2798	0.2785
P99	0.5076	0.5072	0.5045	0.5013	0.4934	0.4913	0.4831	0.4811	0.4727	0.4716	0.4582	0.4566	0.4342	0.4337	0.4146	0.4129	0.3963	0.3934
Max	2.4674	2.4641	2.4550	2.4521	2.4322	2.4288	2.4137	2.4100	2.3964	2.3899	2.3244	2.3208	2.2604	2.2559	2.1866	2.1802	2.1346	2.1273

❖ Matrice lixiviat

Tableau 3.1.4-3. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd ($\text{mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) modélisées dans la matrice lixiviat le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ et une teneur en Cd de $20 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2158	2142	2138	2152	2108	2120	2102	2100	2062	2064	1994	1976	1925	1916	1862	1862	1840	1828
Min	66	60	111	79	93	70	100	95	89	114	91	116	128	112	117	106	119	112
P025	329	325	330	336	337	335	336	340	341	347	360	360	376	367	379	381	398	386
P05	418	422	421	426	432	427	433	434	444	427	448	453	457	457	469	479	490	481
P10	569	559	560	567	572	572	565	580	569	578	584	589	602	601	610	616	628	617
P25	905	903	919	905	913	914	920	919	917	927	933	927	940	936	945	946	965	958
P50	1545	1554	1551	1543	1544	1544	1536	1542	1525	1533	1531	1529	1522	1501	1499	1506	1512	1487
P75	2630	2646	2628	2627	2580	2600	2556	2558	2499	2549	2434	2443	2372	2349	2270	2276	2239	2208
P90	4116	4061	4056	4139	3963	4005	3910	3972	3914	3883	3633	3649	3417	3447	3277	3264	3168	3175
P95	5507	5333	5466	5419	5222	5315	5114	5206	5016	5041	4684	4631	4347	4408	4198	4122	3996	4064
P975	7203	7102	7273	7131	6848	6949	6786	6814	6612	6426	6267	6022	5856	5791	5491	5394	5161	5129
P99	11221	10897	11380	11675	10747	10840	11096	10816	10123	10439	9509	8976	8708	8527	7974	7970	7987	7581
Max	63953	59495	45029	55327	56209	42409	93054	65190	55821	47665	55879	42999	47203	61126	38689	69517	41980	63197

3.2 Résultats obtenus à l'issue de la modélisation liée à un itinéraire monoculture blé avec un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans en fonction de la teneur en Cd testée dans l'intrant (scénarios 5 à 8) et du temps de projection de la simulation

3.2.1 Scénario 5 : [Cd] engrais phosphaté = 90 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.2.1-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 90 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.306	0.305	0.306	0.306	0.307	0.307	0.306	0.308	0.308	0.309	0.312	0.311	0.313	0.315	0.317	0.318	0.321	0.319
Min	0.012	0.012	0.014	0.014	0.018	0.018	0.019	0.021	0.023	0.025	0.034	0.034	0.030	0.036	0.034	0.035	0.036	0.027
P025	0.072	0.072	0.074	0.073	0.076	0.076	0.077	0.078	0.079	0.080	0.085	0.084	0.086	0.087	0.088	0.088	0.090	0.088
P05	0.087	0.087	0.088	0.088	0.091	0.090	0.091	0.092	0.092	0.093	0.098	0.098	0.101	0.102	0.105	0.106	0.107	0.106
P10	0.109	0.108	0.109	0.109	0.111	0.110	0.110	0.113	0.113	0.114	0.117	0.117	0.120	0.121	0.122	0.123	0.125	0.123
P25	0.145	0.144	0.145	0.145	0.147	0.146	0.146	0.147	0.147	0.149	0.152	0.152	0.154	0.156	0.157	0.158	0.160	0.158
P50	0.212	0.211	0.212	0.211	0.213	0.212	0.212	0.214	0.215	0.216	0.220	0.219	0.222	0.225	0.228	0.229	0.232	0.231
P75	0.347	0.346	0.347	0.346	0.346	0.345	0.345	0.346	0.346	0.347	0.351	0.350	0.357	0.359	0.365	0.367	0.372	0.371
P90	0.573	0.572	0.572	0.572	0.573	0.573	0.573	0.574	0.575	0.576	0.581	0.581	0.585	0.587	0.592	0.593	0.600	0.598
P95	0.812	0.811	0.812	0.812	0.813	0.812	0.812	0.814	0.812	0.813	0.812	0.810	0.808	0.811	0.808	0.807	0.808	0.807
P975	1.082	1.070	1.063	1.062	1.062	1.061	1.060	1.062	1.061	1.061	1.060	1.060	1.056	1.057	1.056	1.056	1.038	1.037
P99	1.434	1.432	1.432	1.431	1.430	1.430	1.428	1.429	1.427	1.428	1.424	1.423	1.416	1.417	1.409	1.409	1.406	1.404
Max	5.532	5.523	5.508	5.500	5.456	5.445	5.411	5.403	5.368	5.354	5.192	5.181	5.042	5.034	4.895	4.881	4.763	4.747

❖ Matrice culture (grain de blé)

Tableau 3.2.1-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice culture (grain de blé) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 90 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.0914	0.0911	0.0914	0.0911	0.0915	0.0912	0.0909	0.0915	0.0913	0.0916	0.0918	0.0915	0.0916	0.0922	0.0923	0.0927	0.0930	0.0924
Min	0.0050	0.0050	0.0059	0.0059	0.0075	0.0075	0.0083	0.0091	0.0098	0.0106	0.0130	0.0130	0.0144	0.0147	0.0160	0.0163	0.0173	0.0144
P025	0.0233	0.0233	0.0239	0.0238	0.0250	0.0249	0.0254	0.0258	0.0262	0.0267	0.0287	0.0286	0.0302	0.0307	0.0322	0.0325	0.0340	0.0339
P05	0.0297	0.0296	0.0301	0.0301	0.0309	0.0309	0.0312	0.0316	0.0320	0.0325	0.0346	0.0345	0.0363	0.0368	0.0384	0.0388	0.0402	0.0401
P10	0.0357	0.0356	0.0363	0.0362	0.0371	0.0371	0.0373	0.0379	0.0382	0.0388	0.0410	0.0408	0.0429	0.0435	0.0452	0.0457	0.0471	0.0466
P25	0.0514	0.0513	0.0517	0.0515	0.0523	0.0521	0.0522	0.0528	0.0530	0.0535	0.0549	0.0546	0.0561	0.0567	0.0581	0.0585	0.0596	0.0592
P50	0.0710	0.0707	0.0711	0.0708	0.0715	0.0711	0.0709	0.0717	0.0715	0.0720	0.0728	0.0725	0.0732	0.0739	0.0749	0.0754	0.0764	0.0758
P75	0.1013	0.1011	0.1014	0.1012	0.1010	0.1006	0.0999	0.1005	0.1001	0.1003	0.0993	0.0990	0.0984	0.0991	0.0988	0.0991	0.0991	0.0986
P90	0.1496	0.1494	0.1494	0.1493	0.1494	0.1492	0.1486	0.1490	0.1481	0.1484	0.1473	0.1471	0.1467	0.1473	0.1469	0.1472	0.1473	0.1467
P95	0.1970	0.1963	0.1962	0.1961	0.1946	0.1943	0.1939	0.1942	0.1937	0.1933	0.1889	0.1887	0.1863	0.1867	0.1836	0.1836	0.1820	0.1814
P975	0.2914	0.2898	0.2871	0.2844	0.2835	0.2823	0.2803	0.2801	0.2781	0.2776	0.2713	0.2709	0.2672	0.2675	0.2571	0.2564	0.2511	0.2507
P99	0.4812	0.4807	0.4799	0.4794	0.4768	0.4756	0.4670	0.4672	0.4662	0.4661	0.4447	0.4442	0.4254	0.4256	0.4078	0.4066	0.3936	0.3924
Max	2.4682	2.4636	2.4570	2.4531	2.4326	2.4275	2.4118	2.4080	2.3920	2.3855	2.3106	2.3052	2.2411	2.2375	2.1731	2.1665	2.1122	2.1050

❖ Matrice lixiviât

Tableau 3.2.1-3 Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd ($\text{mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) modélisées dans la matrice sol lixiviât de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1} \text{ an}^{-1}$ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de $90 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2165	2155	2157	2169	2149	2141	2130	2159	2147	2147	2138	2126	2120	2131	2125	2110	2124	2109
Min	85	75	100	53	76	64	99	93	126	76	122	114	134	97	166	119	145	142
P025	335	335	331	334	342	344	344	363	356	373	392	389	399	409	430	427	450	455
P05	422	439	431	427	440	440	442	446	454	457	483	485	510	515	522	537	550	559
P10	565	568	573	574	572	572	580	592	591	607	632	630	655	659	669	681	704	714
P25	915	924	915	925	928	938	943	964	962	959	1005	987	1038	1039	1069	1067	1095	1095
P50	1588	1580	1594	1587	1606	1614	1603	1643	1629	1637	1688	1679	1722	1742	1780	1771	1806	1788
P75	2687	2683	2688	2667	2658	2666	2676	2691	2690	2691	2708	2696	2649	2707	2715	2699	2722	2688
P90	4193	4155	4172	4172	4092	4091	4125	4098	4068	4035	3974	3954	3799	3873	3799	3718	3763	3700
P95	5440	5530	5433	5529	5298	5322	5340	5291	5265	5186	4986	5015	4851	4920	4648	4621	4601	4510
P975	7171	7253	7116	7106	6860	6914	6895	6918	6826	6642	6361	6293	5985	6027	5734	5738	5618	5539
P99	10667	10468	10140	10388	10775	9760	9571	9942	9969	9715	9005	9007	8573	8295	7791	7769	7375	7507
Max	47614	46398	49724	85170	48852	47145	42525	42620	80160	48548	51415	36811	56215	50266	50801	38823	33439	41394

3.2.2 Scénario 6 : [Cd] engrais phosphatée = 60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.2.2-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.311	0.310	0.311	0.310	0.310	0.309	0.308	0.309	0.308	0.308	0.307	0.306	0.304	0.305	0.303	0.303	0.303	0.301
Min	0.011	0.011	0.012	0.012	0.013	0.013	0.014	0.015	0.016	0.017	0.021	0.021	0.026	0.027	0.024	0.026	0.026	0.024
P025	0.071	0.071	0.072	0.071	0.072	0.072	0.072	0.074	0.073	0.074	0.076	0.075	0.075	0.076	0.075	0.075	0.075	0.073
P05	0.086	0.085	0.087	0.086	0.088	0.088	0.088	0.089	0.088	0.089	0.090	0.090	0.089	0.090	0.089	0.090	0.089	0.088
P10	0.109	0.108	0.109	0.108	0.108	0.107	0.107	0.108	0.108	0.108	0.109	0.108	0.107	0.108	0.107	0.108	0.107	0.105
P25	0.145	0.145	0.145	0.144	0.145	0.144	0.143	0.144	0.143	0.144	0.143	0.143	0.141	0.142	0.140	0.141	0.139	0.138
P50	0.213	0.212	0.213	0.212	0.212	0.212	0.212	0.213	0.212	0.213	0.213	0.213	0.212	0.214	0.213	0.214	0.214	0.213
P75	0.351	0.350	0.351	0.350	0.349	0.348	0.346	0.347	0.345	0.345	0.344	0.344	0.344	0.345	0.347	0.348	0.349	0.348
P90	0.572	0.571	0.572	0.571	0.572	0.572	0.571	0.572	0.572	0.573	0.574	0.573	0.575	0.576	0.576	0.576	0.577	0.576
P95	0.835	0.835	0.835	0.835	0.830	0.826	0.823	0.825	0.819	0.815	0.813	0.813	0.795	0.797	0.793	0.793	0.787	0.785
P975	1.111	1.111	1.111	1.110	1.109	1.109	1.107	1.108	1.106	1.106	1.074	1.072	1.047	1.048	1.042	1.041	1.037	1.035
P99	1.572	1.570	1.567	1.566	1.561	1.560	1.554	1.554	1.549	1.548	1.525	1.523	1.485	1.485	1.427	1.424	1.413	1.411
Max	5.532	5.523	5.507	5.499	5.457	5.449	5.416	5.411	5.378	5.362	5.217	5.210	5.063	5.056	4.915	4.902	4.795	4.781

❖ Matrice culture (grain de blé)

Tableau 3.2.2-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice culture (grain de blé) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.0932	0.0929	0.0929	0.0926	0.0923	0.0920	0.0915	0.0918	0.0912	0.0913	0.0899	0.0896	0.0882	0.0886	0.0873	0.0874	0.0868	0.0863
Min	0.0046	0.0046	0.0049	0.0049	0.0057	0.0057	0.0061	0.0064	0.0068	0.0072	0.0092	0.0092	0.0113	0.0116	0.0128	0.0130	0.0136	0.0127
P025	0.0226	0.0226	0.0228	0.0228	0.0234	0.0234	0.0236	0.0240	0.0240	0.0244	0.0255	0.0254	0.0266	0.0270	0.0279	0.0282	0.0290	0.0288
P05	0.0294	0.0294	0.0297	0.0296	0.0300	0.0300	0.0300	0.0304	0.0305	0.0308	0.0317	0.0315	0.0325	0.0330	0.0340	0.0342	0.0350	0.0347
P10	0.0358	0.0357	0.0361	0.0361	0.0364	0.0363	0.0364	0.0369	0.0369	0.0372	0.0383	0.0382	0.0389	0.0393	0.0399	0.0402	0.0407	0.0405
P25	0.0517	0.0516	0.0517	0.0516	0.0518	0.0516	0.0514	0.0518	0.0516	0.0518	0.0521	0.0519	0.0519	0.0524	0.0524	0.0527	0.0527	0.0523
P50	0.0715	0.0713	0.0713	0.0709	0.0710	0.0707	0.0702	0.0706	0.0702	0.0702	0.0693	0.0690	0.0685	0.0689	0.0684	0.0686	0.0684	0.0679
P75	0.1019	0.1015	0.1013	0.1010	0.1001	0.0998	0.0988	0.0991	0.0984	0.0983	0.0961	0.0956	0.0939	0.0942	0.0931	0.0931	0.0924	0.0921
P90	0.1518	0.1517	0.1517	0.1514	0.1495	0.1493	0.1487	0.1488	0.1480	0.1480	0.1448	0.1445	0.1427	0.1430	0.1411	0.1412	0.1396	0.1387
P95	0.2038	0.2037	0.2032	0.2029	0.1992	0.1990	0.1984	0.1986	0.1969	0.1963	0.1912	0.1906	0.1869	0.1871	0.1830	0.1824	0.1805	0.1799
P975	0.3007	0.3004	0.2994	0.2980	0.2963	0.2958	0.2940	0.2942	0.2929	0.2927	0.2903	0.2902	0.2876	0.2874	0.2802	0.2799	0.2770	0.2765
P99	0.5078	0.5075	0.5069	0.5051	0.4984	0.4971	0.4900	0.4888	0.4822	0.4794	0.4567	0.4553	0.4393	0.4386	0.4239	0.4223	0.4093	0.4065
Max	2.4679	2.4639	2.4563	2.4527	2.4332	2.4294	2.4144	2.4117	2.3968	2.3890	2.3219	2.3190	2.2508	2.2478	2.1826	2.1764	2.1268	2.1206

❖ Matrice lixivié

Tableau 3.2.2-3. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd ($\text{mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) modélisées dans la matrice sol lixivié de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de $60 \text{ mg Cd}\cdot\text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2177	2156	2177	2174	2143	2138	2112	2111	2110	2099	2052	2035	1990	2004	1940	1951	1917	1908
Min	65	81	91	88	71	83	92	80	98	108	93	73	103	134	136	123	155	73
P025	325	327	329	329	337	337	335	340	339	354	367	367	378	388	397	391	412	409
P05	426	420	421	423	424	425	424	436	443	440	459	459	476	474	486	495	505	495
P10	568	562	559	566	572	564	574	575	579	579	599	591	602	616	624	630	634	634
P25	905	914	918	914	916	918	919	938	932	939	940	950	958	974	969	991	993	991
P50	1561	1559	1554	1558	1567	1545	1556	1567	1569	1581	1580	1578	1569	1577	1579	1600	1590	1588
P75	2657	2639	2644	2657	2638	2613	2582	2598	2594	2584	2510	2534	2441	2460	2381	2403	2374	2344
P90	4219	4128	4154	4120	4077	4073	3946	3981	3998	3878	3763	3710	3554	3607	3423	3437	3323	3278
P95	5627	5504	5548	5460	5381	5385	5349	5273	5246	5155	4921	4797	4544	4683	4336	4309	4163	4118
P975	7553	7426	7482	7267	7280	7184	7161	6920	6907	6640	6388	6357	6067	5957	5729	5401	5355	5293
P99	11669	11561	11184	12186	10873	10839	10939	9947	10311	10437	9393	9333	8822	9050	8379	8362	7614	7647
Max	44613	49503	62707	86095	50158	56562	40762	47275	57795	42275	75097	44202	67501	47814	40299	41208	58238	75410

3.2.3 Scénario 7 : [Cd] engrais phosphatée = 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.2.3-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.314	0.313	0.313	0.312	0.311	0.310	0.308	0.309	0.307	0.307	0.302	0.302	0.297	0.297	0.293	0.293	0.290	0.289
Min	0.011	0.011	0.011	0.011	0.013	0.013	0.013	0.014	0.015	0.015	0.019	0.019	0.022	0.023	0.021	0.021	0.019	0.019
P025	0.070	0.070	0.070	0.070	0.070	0.069	0.069	0.069	0.069	0.069	0.067	0.066	0.063	0.064	0.062	0.062	0.061	0.061
P05	0.086	0.086	0.086	0.086	0.087	0.086	0.085	0.086	0.085	0.085	0.084	0.084	0.080	0.080	0.078	0.078	0.076	0.075
P10	0.108	0.107	0.107	0.106	0.105	0.105	0.104	0.105	0.103	0.103	0.101	0.101	0.099	0.099	0.096	0.096	0.093	0.092
P25	0.146	0.145	0.145	0.145	0.144	0.143	0.141	0.142	0.140	0.140	0.136	0.136	0.131	0.132	0.128	0.128	0.125	0.124
P50	0.212	0.212	0.212	0.211	0.210	0.210	0.209	0.209	0.208	0.208	0.205	0.205	0.202	0.202	0.200	0.200	0.198	0.198
P75	0.346	0.345	0.345	0.345	0.343	0.342	0.340	0.340	0.338	0.338	0.331	0.331	0.329	0.330	0.328	0.328	0.328	0.327
P90	0.576	0.575	0.575	0.574	0.574	0.573	0.571	0.572	0.571	0.571	0.569	0.569	0.567	0.567	0.565	0.565	0.564	0.562
P95	0.863	0.863	0.863	0.862	0.861	0.860	0.857	0.857	0.856	0.856	0.848	0.846	0.838	0.838	0.829	0.829	0.825	0.824
P975	1.191	1.189	1.185	1.183	1.173	1.171	1.166	1.165	1.162	1.159	1.139	1.138	1.116	1.115	1.087	1.085	1.070	1.067
P99	1.722	1.720	1.719	1.718	1.716	1.715	1.712	1.712	1.709	1.707	1.687	1.686	1.670	1.669	1.655	1.654	1.642	1.629
Max	5.532	5.523	5.503	5.491	5.452	5.445	5.416	5.408	5.375	5.354	5.208	5.199	5.058	5.047	4.897	4.877	4.766	4.751

❖ Matrice culture (grain de blé)

Tableau 3.2.3-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice culture (grain de blé) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.0939	0.0936	0.0934	0.0931	0.0925	0.0922	0.0915	0.0916	0.0909	0.0907	0.0883	0.0881	0.0857	0.0859	0.0838	0.0838	0.0824	0.0820
Min	0.0045	0.0045	0.0048	0.0048	0.0054	0.0054	0.0056	0.0059	0.0063	0.0066	0.0083	0.0082	0.0097	0.0100	0.0107	0.0109	0.0100	0.0096
P025	0.0226	0.0225	0.0226	0.0223	0.0226	0.0226	0.0225	0.0228	0.0227	0.0229	0.0235	0.0234	0.0236	0.0238	0.0240	0.0242	0.0245	0.0243
P05	0.0290	0.0290	0.0291	0.0291	0.0291	0.0290	0.0290	0.0293	0.0292	0.0293	0.0289	0.0288	0.0284	0.0288	0.0291	0.0292	0.0294	0.0292
P10	0.0350	0.0348	0.0350	0.0350	0.0350	0.0349	0.0349	0.0352	0.0351	0.0352	0.0355	0.0354	0.0354	0.0356	0.0354	0.0355	0.0353	0.0350
P25	0.0515	0.0513	0.0513	0.0511	0.0509	0.0507	0.0503	0.0505	0.0500	0.0501	0.0492	0.0490	0.0482	0.0484	0.0475	0.0476	0.0470	0.0467
P50	0.0717	0.0715	0.0714	0.0712	0.0707	0.0705	0.0700	0.0701	0.0693	0.0692	0.0675	0.0673	0.0658	0.0660	0.0643	0.0642	0.0630	0.0626
P75	0.1030	0.1023	0.1018	0.1014	0.1005	0.1004	0.0994	0.0995	0.0983	0.0979	0.0945	0.0941	0.0913	0.0915	0.0896	0.0896	0.0884	0.0879
P90	0.1582	0.1577	0.1571	0.1566	0.1552	0.1541	0.1521	0.1520	0.1507	0.1504	0.1457	0.1452	0.1418	0.1418	0.1392	0.1392	0.1380	0.1377
P95	0.2072	0.2061	0.2051	0.2041	0.2026	0.2023	0.2009	0.2007	0.1992	0.1987	0.1956	0.1944	0.1895	0.1896	0.1859	0.1856	0.1827	0.1815
P975	0.3414	0.3410	0.3406	0.3403	0.3391	0.3387	0.3377	0.3377	0.3367	0.3356	0.3091	0.3081	0.3017	0.3016	0.2941	0.2940	0.2905	0.2900
P99	0.5126	0.5099	0.5070	0.5065	0.5003	0.4987	0.4957	0.4950	0.4888	0.4854	0.4593	0.4590	0.4468	0.4465	0.4276	0.4261	0.4142	0.4132
Max	2.4679	2.4638	2.4546	2.4488	2.4309	2.4276	2.4144	2.4107	2.3954	2.3853	2.3178	2.3138	2.2486	2.2434	2.1741	2.1649	2.1138	2.1069

❖ Matrice lixiviat

Tableau 3.2.3-3. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd ($\text{mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) modélisées dans la matrice sol lixiviat de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de $40 \text{ mg Cd}\cdot\text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2158	2175	2164	2156	2137	2115	2107	2097	2068	2067	2006	1977	1898	1904	1844	1826	1798	1769
Min	90	71	95	93	86	89	71	74	82	101	89	115	104	109	61	116	117	62
P025	328	327	328	329	327	327	338	339	342	348	355	355	361	369	372	376	378	388
P05	418	426	426	427	421	422	426	433	427	440	444	456	457	459	470	474	471	473
P10	563	570	562	569	567	564	579	568	571	580	580	583	599	603	611	610	612	609
P25	931	923	928	926	932	919	926	931	933	926	939	936	937	946	943	942	954	935
P50	1577	1575	1585	1580	1571	1577	1569	1557	1575	1560	1557	1549	1506	1503	1490	1494	1476	1459
P75	2703	2680	2650	2664	2624	2647	2592	2619	2541	2574	2462	2439	2330	2334	2251	2240	2192	2166
P90	4135	4132	4185	4089	4091	4054	3981	3948	3840	3904	3671	3644	3401	3419	3244	3201	3117	3104
P95	5424	5542	5454	5515	5277	5299	5315	5070	5122	5089	4770	4654	4377	4380	4169	4046	4013	3912
P975	7220	7383	7272	7312	7074	6822	6737	6729	6712	6569	6091	6014	5643	5609	5361	5335	5213	5002
P99	11011	10782	11554	10883	10481	10193	10236	10105	10045	9686	9063	9245	8508	8130	7779	7742	7573	7245
Max	40867	63639	57205	62161	64927	53943	44424	41320	75287	35754	47085	39902	53258	64486	65808	28410	35534	33457

3.2.4 Scénario 8 : [Cd] engrais phosphatée = 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.2.4-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.309	0.308	0.307	0.306	0.304	0.303	0.301	0.301	0.299	0.299	0.291	0.290	0.283	0.283	0.276	0.276	0.271	0.270
Min	0.010	0.010	0.011	0.011	0.011	0.011	0.012	0.012	0.013	0.013	0.015	0.015	0.014	0.015	0.013	0.013	0.012	0.011
P025	0.069	0.069	0.069	0.069	0.068	0.068	0.067	0.067	0.066	0.066	0.061	0.060	0.055	0.055	0.051	0.050	0.048	0.048
P05	0.086	0.084	0.084	0.084	0.083	0.082	0.081	0.081	0.080	0.080	0.074	0.074	0.068	0.069	0.064	0.063	0.060	0.059
P10	0.106	0.105	0.104	0.104	0.102	0.102	0.100	0.100	0.099	0.099	0.094	0.093	0.088	0.088	0.082	0.082	0.078	0.077
P25	0.143	0.142	0.141	0.141	0.139	0.139	0.137	0.137	0.135	0.135	0.128	0.127	0.120	0.120	0.115	0.114	0.110	0.109
P50	0.210	0.209	0.209	0.208	0.206	0.205	0.204	0.204	0.203	0.202	0.196	0.196	0.190	0.190	0.185	0.185	0.181	0.180
P75	0.347	0.346	0.345	0.345	0.344	0.343	0.340	0.340	0.337	0.337	0.329	0.328	0.323	0.323	0.319	0.319	0.314	0.313
P90	0.577	0.576	0.576	0.575	0.573	0.573	0.572	0.572	0.571	0.570	0.566	0.566	0.561	0.561	0.557	0.556	0.552	0.551
P95	0.849	0.849	0.847	0.845	0.843	0.842	0.838	0.838	0.836	0.835	0.821	0.820	0.799	0.798	0.783	0.782	0.769	0.768
P975	1.110	1.110	1.109	1.107	1.103	1.099	1.085	1.084	1.077	1.075	1.045	1.045	1.025	1.025	1.012	1.009	0.993	0.990
P99	1.570	1.567	1.561	1.559	1.545	1.541	1.528	1.525	1.514	1.510	1.461	1.459	1.411	1.409	1.392	1.388	1.377	1.373
Max	5.531	5.522	5.501	5.493	5.446	5.435	5.397	5.391	5.355	5.338	5.174	5.164	4.997	4.992	4.840	4.827	4.709	4.694

❖ Matrice culture (grain de blé)

Tableau 3.2.4-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice culture (grain de blé) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.0915	0.0912	0.0908	0.0905	0.0895	0.0892	0.0883	0.0882	0.0874	0.0870	0.0837	0.0835	0.0804	0.0803	0.0776	0.0774	0.0754	0.0750
Min	0.0044	0.0044	0.0045	0.0045	0.0048	0.0048	0.0049	0.0051	0.0053	0.0054	0.0062	0.0062	0.0070	0.0071	0.0077	0.0079	0.0080	0.0073
P025	0.0229	0.0227	0.0227	0.0226	0.0224	0.0223	0.0221	0.0223	0.0223	0.0223	0.0222	0.0220	0.0213	0.0214	0.0207	0.0207	0.0203	0.0201
P05	0.0292	0.0291	0.0291	0.0290	0.0289	0.0288	0.0286	0.0287	0.0285	0.0284	0.0272	0.0271	0.0261	0.0262	0.0258	0.0258	0.0252	0.0249
P10	0.0352	0.0351	0.0351	0.0350	0.0348	0.0346	0.0342	0.0344	0.0340	0.0340	0.0330	0.0329	0.0319	0.0320	0.0312	0.0311	0.0304	0.0300
P25	0.0507	0.0505	0.0504	0.0501	0.0495	0.0493	0.0487	0.0487	0.0482	0.0481	0.0464	0.0463	0.0444	0.0444	0.0424	0.0424	0.0408	0.0405
P50	0.0713	0.0710	0.0707	0.0704	0.0695	0.0692	0.0684	0.0683	0.0673	0.0671	0.0646	0.0643	0.0615	0.0615	0.0591	0.0589	0.0571	0.0567
P75	0.1012	0.1007	0.1003	0.0998	0.0983	0.0980	0.0965	0.0963	0.0952	0.0948	0.0899	0.0897	0.0866	0.0865	0.0833	0.0831	0.0807	0.0803
P90	0.1516	0.1514	0.1497	0.1490	0.1483	0.1480	0.1472	0.1468	0.1453	0.1448	0.1406	0.1404	0.1365	0.1364	0.1331	0.1329	0.1307	0.1303
P95	0.1961	0.1955	0.1944	0.1938	0.1920	0.1919	0.1915	0.1914	0.1902	0.1899	0.1848	0.1845	0.1784	0.1783	0.1738	0.1735	0.1709	0.1706
P975	0.3003	0.3000	0.2974	0.2968	0.2938	0.2936	0.2925	0.2923	0.2912	0.2908	0.2840	0.2837	0.2778	0.2772	0.2668	0.2660	0.2599	0.2592
P99	0.5014	0.5008	0.5001	0.4997	0.4945	0.4929	0.4851	0.4828	0.4729	0.4716	0.4563	0.4559	0.4411	0.4408	0.4234	0.4212	0.4050	0.4029
Max	2.4673	2.4635	2.4538	2.4499	2.4280	2.4230	2.4056	2.4025	2.3861	2.3780	2.3023	2.2973	2.2203	2.2177	2.1479	2.1419	2.0875	2.0804

❖ Matrice lixiviât

Tableau 3.2.4-3. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd ($\text{mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) modélisées dans la matrice sol lixiviât de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de $20 \text{ mg Cd}\cdot\text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2156	2150	2131	2133	2092	2080	2034	2045	2018	1998	1901	1892	1778	1780	1691	1688	1615	1608
Min	67	106	78	97	92	84	90	69	65	99	111	83	67	85	89	80	104	111
P025	323	326	336	337	332	331	329	334	324	329	335	338	333	340	336	349	352	350
P05	420	417	423	425	418	425	422	422	421	424	426	425	423	428	433	437	437	436
P10	560	564	570	560	562	562	561	556	560	564	559	571	564	564	564	561	569	560
P25	920	927	911	922	922	907	913	904	908	901	898	901	874	880	871	870	858	856
P50	1574	1550	1557	1560	1553	1546	1511	1534	1516	1515	1457	1454	1395	1414	1342	1354	1302	1310
P75	2647	2632	2609	2593	2571	2565	2513	2497	2483	2460	2323	2337	2157	2180	2049	2025	1947	1945
P90	4125	4166	4075	4093	3967	3937	3855	3881	3755	3746	3520	3489	3192	3237	2943	2966	2811	2788
P95	5538	5523	5470	5395	5248	5236	5112	5075	4970	4890	4523	4489	4153	4174	3850	3856	3564	3548
P975	7271	7249	7388	7224	7234	6925	6717	6928	6678	6371	5951	5930	5568	5374	5090	5093	4581	4639
P99	11186	10784	11058	10323	10138	10529	9871	10305	9777	9466	9036	8758	8068	8015	7785	7853	6954	6957
Max	43853	73387	48761	49851	40865	44430	40726	36774	42530	74103	45819	38702	46432	41649	52798	35482	35223	35155

3.3 Résultats obtenus à l'issue de la modélisation liée à un itinéraire rotation pomme de terre-blé-blé avec un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ en fonction de la teneur en Cd testée dans l'intrant (scénarios 9 à 12) et du temps de projection de la simulation

3.3.1 Scénario 9 : [Cd] engrais phosphatée = 90 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.3.1-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi qu'une teneur en Cd de 90 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.314	0.315	0.318	0.320	0.327	0.328	0.334	0.335	0.341	0.343	0.366	0.367	0.390	0.390	0.411	0.412	0.427	0.430
Min	0.012	0.013	0.017	0.019	0.027	0.028	0.035	0.036	0.042	0.045	0.070	0.072	0.084	0.084	0.087	0.087	0.085	0.086
P025	0.073	0.076	0.079	0.081	0.089	0.090	0.096	0.097	0.103	0.106	0.128	0.129	0.148	0.148	0.161	0.162	0.170	0.172
P05	0.089	0.092	0.095	0.097	0.105	0.106	0.114	0.115	0.121	0.123	0.145	0.146	0.164	0.164	0.178	0.179	0.187	0.189
P10	0.112	0.113	0.116	0.118	0.125	0.127	0.133	0.134	0.140	0.142	0.163	0.164	0.182	0.182	0.197	0.198	0.208	0.210
P25	0.148	0.150	0.153	0.154	0.161	0.162	0.169	0.169	0.175	0.178	0.199	0.201	0.221	0.221	0.238	0.239	0.252	0.254
P50	0.212	0.214	0.218	0.219	0.228	0.230	0.237	0.238	0.244	0.248	0.275	0.276	0.301	0.302	0.325	0.327	0.342	0.345
P75	0.348	0.349	0.352	0.354	0.361	0.362	0.369	0.370	0.376	0.378	0.409	0.411	0.440	0.440	0.468	0.471	0.492	0.496
P90	0.576	0.578	0.581	0.583	0.590	0.593	0.602	0.602	0.613	0.616	0.650	0.653	0.684	0.685	0.707	0.709	0.733	0.737
P95	0.852	0.853	0.854	0.856	0.861	0.863	0.870	0.869	0.872	0.873	0.883	0.884	0.902	0.901	0.925	0.927	0.940	0.944
P975	1.167	1.171	1.172	1.174	1.175	1.176	1.173	1.170	1.169	1.164	1.159	1.161	1.156	1.154	1.155	1.155	1.157	1.162
P99	1.572	1.573	1.566	1.567	1.555	1.556	1.550	1.543	1.539	1.532	1.497	1.498	1.468	1.460	1.454	1.451	1.451	1.455
Max	5.533	5.528	5.497	5.492	5.427	5.422	5.379	5.355	5.312	5.283	5.077	5.072	4.865	4.845	4.662	4.636	4.476	4.466

❖ Matrice culture (grain de blé, pomme de terre)

Tableau 3.3.1-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice culture (grain de blé, pomme de terre (pdt)) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi qu'une teneur en Cd de 90 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
	pdt	blé	pdt	blé	pdt	blé	blé	pdt	blé	pdt	pdt	blé	blé	pdt	blé	pdt	pdt	blé
Moy	0.0426	0.0945	0.0432	0.0959	0.0445	0.0986	0.1005	0.0457	0.1025	0.0468	0.0499	0.1108	0.1177	0.0529	0.1240	0.0556	0.0573	0.1297
Min	0.0062	0.0057	0.0065	0.0079	0.0070	0.0119	0.0129	0.0075	0.0142	0.0080	0.0095	0.0185	0.0223	0.0110	0.0262	0.0121	0.0129	0.0299
P025	0.0130	0.0241	0.0135	0.0256	0.0150	0.0281	0.0298	0.0159	0.0316	0.0166	0.0189	0.0394	0.0462	0.0210	0.0521	0.0228	0.0239	0.0576
P05	0.0163	0.0301	0.0169	0.0315	0.0178	0.0344	0.0362	0.0186	0.0384	0.0194	0.0214	0.0468	0.0534	0.0237	0.0598	0.0257	0.0270	0.0655
P10	0.0195	0.0365	0.0201	0.0383	0.0213	0.0418	0.0437	0.0222	0.0460	0.0231	0.0253	0.0553	0.0624	0.0275	0.0695	0.0296	0.0310	0.0758
P25	0.0272	0.0526	0.0278	0.0543	0.0291	0.0573	0.0595	0.0303	0.0621	0.0313	0.0341	0.0720	0.0800	0.0366	0.0872	0.0390	0.0406	0.0938
P50	0.0377	0.0726	0.0385	0.0744	0.0400	0.0777	0.0800	0.0414	0.0825	0.0428	0.0464	0.0927	0.1012	0.0502	0.1087	0.0535	0.0555	0.1154
P75	0.0499	0.1015	0.0509	0.1029	0.0528	0.1055	0.1076	0.0543	0.1100	0.0559	0.0604	0.1198	0.1280	0.0646	0.1357	0.0682	0.0704	0.1423
P90	0.0676	0.1539	0.0679	0.1547	0.0691	0.1566	0.1583	0.0703	0.1597	0.0717	0.0748	0.1655	0.1724	0.0781	0.1776	0.0806	0.0822	0.1829
P95	0.0816	0.2072	0.0816	0.2068	0.0821	0.2072	0.2079	0.0825	0.2084	0.0830	0.0854	0.2118	0.2145	0.0871	0.2172	0.0891	0.0905	0.2202
P975	0.1055	0.3184	0.1054	0.3178	0.1051	0.3170	0.3162	0.1047	0.3156	0.1047	0.1034	0.3126	0.3123	0.1022	0.3102	0.1017	0.1016	0.3080
P99	0.1588	0.4996	0.1574	0.4923	0.1550	0.4783	0.4758	0.1521	0.4722	0.1484	0.1404	0.4625	0.4548	0.1330	0.4389	0.1299	0.1280	0.4329
Max	0.4056	2.4660	0.4035	2.4497	0.3993	2.4170	2.3969	0.3950	2.3661	0.3907	0.3784	2.2551	2.1594	0.3643	2.0659	0.3515	0.3416	1.9752

❖ Matrice lixiviée

Tableau 3.3.1-3. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.ha⁻¹) modélisées dans la matrice sol lixiviée de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi qu'une teneur en Cd de 90 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2426	2204	2481	2238	2550	2311	2366	2647	2420	2706	2906	2626	2812	3100	2949	3294	3387	3081
Min	77	96	117	103	117	67	117	144	125	149	144	165	174	188	171	266	298	230
P025	370	326	386	352	422	365	389	447	404	471	531	475	534	608	581	693	725	634
P05	466	421	490	437	515	459	484	543	501	575	651	574	655	735	702	818	865	762
P10	619	562	650	572	675	607	640	706	656	747	835	733	822	924	882	999	1072	947
P25	1042	927	1050	955	1109	1008	1039	1168	1058	1194	1327	1185	1285	1443	1380	1556	1631	1468
P50	1781	1605	1828	1656	1923	1746	1793	2028	1857	2110	2315	2097	2280	2573	2456	2795	2952	2628
P75	2977	2673	3062	2747	3195	2900	2959	3349	3077	3457	3793	3405	3678	4106	3952	4418	4557	4142
P90	4615	4228	4673	4288	4784	4428	4486	4979	4588	5109	5443	4890	5287	5760	5513	6048	6158	5696
P95	5978	5632	6175	5670	6172	5676	5790	6381	6037	6450	6752	6297	6507	6991	6662	7292	7387	6731
P975	8166	7402	8077	7388	8245	7635	7520	8102	7683	8361	8559	7794	8003	8489	7853	8583	8519	8062
P99	12654	11364	12704	11060	12707	11213	10997	11810	10822	11696	11266	10587	10250	11261	9981	11006	10429	10004
Max	51268	50895	72071	59067	60779	41432	46913	60197	45735	54251	57130	41585	40996	46597	42434	57623	57767	42382

3.3.2 Scénario 10 : [Cd] engrais phosphatée = 60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.3.2-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi qu'une teneur en Cd de 60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.310	0.311	0.312	0.313	0.316	0.317	0.320	0.319	0.322	0.323	0.333	0.334	0.345	0.344	0.354	0.354	0.361	0.363
Min	0.011	0.012	0.014	0.015	0.019	0.020	0.023	0.024	0.027	0.029	0.043	0.044	0.057	0.058	0.056	0.057	0.058	0.058
P025	0.071	0.072	0.074	0.076	0.081	0.082	0.085	0.086	0.089	0.091	0.103	0.104	0.114	0.114	0.122	0.123	0.127	0.128
P05	0.086	0.087	0.089	0.091	0.096	0.097	0.101	0.101	0.105	0.106	0.119	0.119	0.129	0.129	0.136	0.137	0.141	0.142
P10	0.108	0.109	0.111	0.112	0.116	0.117	0.121	0.121	0.125	0.126	0.138	0.138	0.148	0.148	0.155	0.156	0.160	0.161
P25	0.146	0.147	0.149	0.150	0.153	0.154	0.157	0.158	0.160	0.161	0.172	0.173	0.183	0.183	0.192	0.192	0.198	0.199
P50	0.212	0.213	0.215	0.216	0.220	0.221	0.225	0.226	0.229	0.230	0.244	0.245	0.257	0.256	0.268	0.269	0.278	0.280
P75	0.347	0.347	0.349	0.350	0.353	0.354	0.356	0.355	0.358	0.358	0.376	0.378	0.392	0.392	0.407	0.408	0.418	0.420
P90	0.579	0.580	0.580	0.582	0.586	0.589	0.595	0.594	0.600	0.601	0.615	0.617	0.636	0.635	0.649	0.649	0.653	0.655
P95	0.855	0.856	0.856	0.857	0.858	0.860	0.864	0.862	0.866	0.864	0.862	0.863	0.865	0.862	0.865	0.865	0.869	0.871
P975	1.132	1.133	1.132	1.133	1.132	1.133	1.133	1.131	1.132	1.125	1.102	1.102	1.068	1.066	1.067	1.065	1.055	1.056
P99	1.441	1.442	1.440	1.441	1.438	1.439	1.438	1.433	1.424	1.421	1.410	1.410	1.399	1.396	1.387	1.385	1.370	1.370
Max	5.533	5.526	5.494	5.486	5.405	5.398	5.351	5.328	5.273	5.241	5.007	5.000	4.773	4.750	4.534	4.509	4.345	4.335

❖ Matrice culture (grain de blé, pomme de terre)

Tableau 3.3.2-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice culture (grain de blé, pomme de terre (pdt)) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi qu'une teneur en Cd de 60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
	pdt	blé	pdt	blé	pdt	blé	blé	pdt	blé	pdt	pdt	blé	blé	pdt	blé	pdt	pdt	blé
Moy	0.0421	0.0928	0.0424	0.0933	0.0429	0.0943	0.0951	0.0434	0.0958	0.0439	0.0452	0.0990	0.1018	0.0465	0.1042	0.0477	0.0484	0.1066
Min	0.0062	0.0050	0.0064	0.0062	0.0067	0.0085	0.0100	0.0071	0.0118	0.0075	0.0085	0.0159	0.0188	0.0096	0.0216	0.0103	0.0108	0.0241
P025	0.0130	0.0224	0.0134	0.0234	0.0144	0.0258	0.0268	0.0152	0.0280	0.0158	0.0173	0.0328	0.0370	0.0190	0.0411	0.0203	0.0211	0.0447
P05	0.0168	0.0291	0.0171	0.0300	0.0175	0.0320	0.0332	0.0181	0.0345	0.0185	0.0200	0.0399	0.0442	0.0215	0.0485	0.0230	0.0239	0.0519
P10	0.0196	0.0356	0.0199	0.0366	0.0207	0.0388	0.0403	0.0213	0.0418	0.0219	0.0236	0.0476	0.0524	0.0251	0.0566	0.0266	0.0275	0.0604
P25	0.0271	0.0513	0.0275	0.0521	0.0282	0.0538	0.0551	0.0289	0.0565	0.0296	0.0314	0.0621	0.0666	0.0331	0.0707	0.0347	0.0356	0.0743
P50	0.0371	0.0718	0.0376	0.0726	0.0385	0.0742	0.0754	0.0393	0.0764	0.0399	0.0418	0.0813	0.0857	0.0440	0.0891	0.0459	0.0469	0.0924
P75	0.0495	0.1022	0.0499	0.1025	0.0506	0.1033	0.1038	0.0513	0.1042	0.0521	0.0538	0.1072	0.1098	0.0556	0.1125	0.0572	0.0582	0.1154
P90	0.0673	0.1536	0.0672	0.1534	0.0670	0.1536	0.1531	0.0670	0.1531	0.0669	0.0671	0.1533	0.1549	0.0671	0.1557	0.0672	0.0673	0.1569
P95	0.0806	0.2036	0.0802	0.2036	0.0793	0.2029	0.2016	0.0787	0.2003	0.0781	0.0772	0.1977	0.1971	0.0761	0.1953	0.0751	0.0747	0.1949
P975	0.1031	0.3095	0.1015	0.3092	0.0987	0.3087	0.3085	0.0966	0.3077	0.0939	0.0902	0.2996	0.2975	0.0876	0.2867	0.0858	0.0840	0.2812
P99	0.1508	0.4997	0.1482	0.4898	0.1440	0.4762	0.4723	0.1405	0.4639	0.1373	0.1325	0.4452	0.4243	0.1280	0.3964	0.1222	0.1188	0.3784
Max	0.4057	2.4651	0.4033	2.4466	0.3980	2.4061	2.3841	0.3934	2.3479	0.3882	0.3741	2.2219	2.1170	0.3585	2.0067	0.3436	0.3335	1.9154

❖ Matrice lixiviat

Tableau 3.3.2-3. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd ($\text{mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) modélisées dans la matrice sol lixiviat de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ainsi qu'une teneur en Cd de $60 \text{ mg Cd}\cdot\text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2397	2167	2415	2186	2454	2208	2219	2476	2244	2484	2582	2311	2373	2630	2437	2699	2756	2481
Min	112	67	74	81	127	92	94	124	138	143	117	137	141	138	150	181	246	180
P025	375	333	386	344	411	359	376	419	379	450	480	428	475	540	512	580	618	544
P05	476	422	488	437	507	451	472	527	476	547	598	526	579	660	615	704	738	655
P10	639	561	637	577	659	592	603	688	617	714	769	678	725	834	768	880	926	807
P25	1033	916	1040	932	1067	960	973	1097	994	1131	1212	1087	1121	1275	1209	1356	1391	1251
P50	1716	1559	1763	1599	1812	1615	1669	1868	1694	1920	2079	1839	1932	2186	2052	2283	2373	2107
P75	2920	2642	2959	2676	3054	2702	2751	3097	2771	3140	3293	2952	3070	3421	3173	3509	3606	3268
P90	4625	4171	4699	4210	4664	4220	4251	4656	4256	4638	4733	4297	4340	4749	4419	4822	4876	4443
P95	6152	5539	6139	5561	6134	5549	5482	6112	5583	5897	5891	5370	5448	5887	5340	5908	5888	5380
P975	8220	7244	8014	7334	7951	7204	7221	7713	7192	7629	7410	6813	6690	7136	6691	7214	7179	6424
P99	12353	11243	11906	10973	12009	11086	10868	11674	10420	11050	10459	9945	9088	9945	8651	9649	9243	8224
Max	49697	45271	59420	70560	58713	52424	46880	48113	65272	49508	41983	35517	35209	42569	38495	45886	37665	40974

3.3.3 Scénario 11 : [Cd] engrais phosphatée = 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.3.3-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi qu'une teneur en Cd de 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.310	0.310	0.310	0.311	0.311	0.311	0.312	0.311	0.312	0.312	0.313	0.314	0.316	0.316	0.318	0.318	0.319	0.320
Min	0.011	0.012	0.013	0.014	0.018	0.019	0.022	0.023	0.026	0.028	0.039	0.040	0.048	0.047	0.043	0.044	0.043	0.043
P025	0.071	0.071	0.072	0.073	0.075	0.076	0.078	0.078	0.080	0.081	0.088	0.088	0.092	0.091	0.094	0.094	0.097	0.097
P05	0.088	0.089	0.090	0.091	0.093	0.093	0.094	0.094	0.096	0.097	0.102	0.103	0.108	0.108	0.110	0.110	0.111	0.112
P10	0.110	0.110	0.110	0.111	0.112	0.113	0.114	0.114	0.116	0.116	0.121	0.121	0.125	0.125	0.127	0.127	0.128	0.129
P25	0.147	0.148	0.148	0.149	0.150	0.150	0.151	0.151	0.152	0.152	0.155	0.155	0.159	0.158	0.160	0.160	0.161	0.162
P50	0.215	0.215	0.216	0.216	0.218	0.219	0.220	0.220	0.222	0.222	0.228	0.229	0.234	0.233	0.237	0.237	0.241	0.242
P75	0.348	0.349	0.349	0.349	0.348	0.349	0.350	0.349	0.349	0.349	0.355	0.356	0.362	0.362	0.367	0.368	0.372	0.373
P90	0.577	0.577	0.577	0.578	0.579	0.579	0.582	0.581	0.583	0.582	0.586	0.587	0.591	0.591	0.594	0.594	0.594	0.596
P95	0.846	0.847	0.846	0.847	0.844	0.844	0.844	0.842	0.842	0.842	0.834	0.834	0.817	0.815	0.803	0.798	0.794	0.795
P975	1.101	1.100	1.085	1.083	1.058	1.058	1.057	1.054	1.052	1.047	1.026	1.026	1.007	1.004	0.987	0.986	0.971	0.972
P99	1.571	1.569	1.557	1.557	1.528	1.525	1.488	1.443	1.432	1.431	1.415	1.416	1.398	1.391	1.358	1.355	1.343	1.343
Max	5.532	5.523	5.479	5.470	5.384	5.376	5.322	5.295	5.242	5.205	4.919	4.912	4.640	4.614	4.370	4.340	4.146	4.128

❖ Matrice culture (grain de blé, pomme de terre)

Tableau 3.3.3-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice culture (grain de blé, pomme de terre (pdt)) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi qu'une teneur en Cd de 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
	pdt	blé	pdt	blé	pdt	blé	blé	pdt	blé	pdt	pdt	blé	blé	pdt	blé	pdt	pdt	blé
Moy	0.0423	0.0924	0.0423	0.0924	0.0423	0.0922	0.0923	0.0423	0.0921	0.0423	0.0423	0.0918	0.0919	0.0424	0.0917	0.0425	0.0425	0.0919
Min	0.0062	0.0049	0.0063	0.0060	0.0065	0.0082	0.0096	0.0067	0.0110	0.0069	0.0074	0.0130	0.0147	0.0080	0.0165	0.0087	0.0091	0.0182
P025	0.0138	0.0236	0.0141	0.0242	0.0145	0.0256	0.0264	0.0149	0.0272	0.0153	0.0164	0.0302	0.0326	0.0175	0.0349	0.0185	0.0191	0.0371
P05	0.0171	0.0301	0.0172	0.0307	0.0175	0.0317	0.0324	0.0179	0.0332	0.0181	0.0190	0.0364	0.0387	0.0198	0.0415	0.0209	0.0216	0.0438
P10	0.0199	0.0357	0.0202	0.0364	0.0205	0.0375	0.0384	0.0209	0.0392	0.0214	0.0225	0.0427	0.0455	0.0235	0.0478	0.0243	0.0249	0.0499
P25	0.0272	0.0513	0.0274	0.0516	0.0277	0.0524	0.0529	0.0281	0.0536	0.0285	0.0296	0.0561	0.0581	0.0306	0.0599	0.0315	0.0321	0.0614
P50	0.0369	0.0718	0.0371	0.0720	0.0375	0.0722	0.0725	0.0378	0.0726	0.0381	0.0388	0.0738	0.0749	0.0395	0.0759	0.0404	0.0408	0.0769
P75	0.0496	0.1025	0.0496	0.1019	0.0496	0.1013	0.1011	0.0497	0.1004	0.0496	0.0495	0.0991	0.0985	0.0494	0.0981	0.0493	0.0493	0.0981
P90	0.0676	0.1584	0.0673	0.1577	0.0667	0.1558	0.1549	0.0660	0.1521	0.0650	0.0631	0.1482	0.1459	0.0613	0.1439	0.0600	0.0591	0.1426
P95	0.0815	0.2033	0.0807	0.2031	0.0796	0.2004	0.1988	0.0784	0.1975	0.0771	0.0739	0.1906	0.1864	0.0706	0.1823	0.0685	0.0668	0.1788
P975	0.1031	0.3034	0.1020	0.3002	0.0990	0.2993	0.2989	0.0954	0.2972	0.0916	0.0876	0.2882	0.2795	0.0834	0.2706	0.0801	0.0779	0.2577
P99	0.1615	0.5077	0.1598	0.5001	0.1544	0.4864	0.4747	0.1493	0.4644	0.1443	0.1339	0.4310	0.4033	0.1265	0.3836	0.1187	0.1144	0.3676
Max	0.4056	2.4637	0.4024	2.4394	0.3968	2.3958	2.3706	0.3914	2.3335	0.3860	0.3688	2.1810	2.0554	0.3501	1.9313	0.3332	0.3211	1.8200

❖ Matrice lixiviât

Tableau 3.3.3-3. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.ha⁻¹) modélisées dans la matrice sol lixiviât de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi qu'une teneur en Cd de 40 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2403	2163	2395	2162	2393	2157	2149	2371	2145	2376	2344	2116	2112	2317	2091	2318	2307	2085
Min	107	83	116	72	76	104	61	113	81	123	132	132	158	185	161	194	164	146
P025	385	337	391	349	414	359	361	423	365	427	470	406	426	487	459	525	536	479
P05	479	436	489	435	505	457	453	520	453	531	565	489	518	585	551	630	651	579
P10	639	564	645	573	662	594	591	670	600	678	723	635	665	751	690	784	817	717
P25	1028	916	1029	917	1049	943	953	1064	962	1089	1126	1011	1043	1181	1065	1206	1229	1097
P50	1733	1557	1749	1562	1770	1604	1593	1791	1612	1803	1852	1669	1725	1908	1753	1966	1987	1772
P75	2959	2631	2927	2643	2967	2640	2660	2927	2708	2920	2964	2668	2682	2937	2663	2931	2947	2672
P90	4592	4215	4590	4193	4597	4086	4142	4485	4104	4412	4275	3913	3837	4143	3737	4050	4029	3662
P95	6092	5672	6068	5574	5991	5535	5481	5857	5289	5788	5522	4995	4795	5212	4591	5025	4911	4463
P975	8169	7695	8042	7487	8046	7296	7130	7625	6892	7612	6970	6450	6003	6390	5786	6305	5941	5515
P99	12727	11201	11923	11319	11560	10848	10526	11365	9990	11403	9887	9566	8724	9276	7867	8711	7901	7432
Max	42875	45308	68064	40675	50397	44339	30642	93148	35691	54224	42821	46277	36964	37531	46674	40582	29776	42961

3.3.4 Scénario 12 : [Cd] engrais phosphatée = 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.3.4-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi qu'une teneur en Cd de 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.309	0.309	0.308	0.308	0.305	0.305	0.304	0.302	0.301	0.300	0.293	0.293	0.288	0.287	0.282	0.281	0.277	0.277
Min	0.010	0.011	0.012	0.012	0.013	0.014	0.015	0.015	0.017	0.017	0.022	0.022	0.021	0.021	0.021	0.021	0.021	0.022
P025	0.071	0.071	0.071	0.071	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.071	0.071	0.068	0.068	0.066	0.066	0.065	0.065
P05	0.086	0.087	0.086	0.087	0.087	0.087	0.086	0.086	0.086	0.086	0.083	0.083	0.081	0.081	0.079	0.078	0.077	0.077
P10	0.109	0.109	0.108	0.108	0.106	0.106	0.105	0.105	0.104	0.104	0.101	0.102	0.099	0.098	0.095	0.094	0.092	0.092
P25	0.146	0.146	0.145	0.145	0.143	0.143	0.142	0.142	0.141	0.139	0.135	0.135	0.132	0.131	0.126	0.126	0.123	0.123
P50	0.211	0.212	0.211	0.211	0.209	0.209	0.209	0.209	0.209	0.208	0.204	0.204	0.201	0.200	0.197	0.197	0.195	0.195
P75	0.346	0.347	0.346	0.346	0.344	0.344	0.342	0.340	0.339	0.338	0.333	0.333	0.330	0.329	0.325	0.325	0.323	0.323
P90	0.576	0.575	0.574	0.574	0.571	0.572	0.571	0.569	0.569	0.568	0.563	0.563	0.559	0.558	0.552	0.551	0.547	0.547
P95	0.850	0.850	0.847	0.846	0.839	0.839	0.837	0.835	0.834	0.829	0.808	0.807	0.787	0.785	0.764	0.762	0.749	0.749
P975	1.111	1.111	1.107	1.107	1.098	1.098	1.093	1.080	1.075	1.066	1.029	1.028	0.998	0.995	0.970	0.963	0.950	0.949
P99	1.570	1.570	1.561	1.560	1.541	1.540	1.521	1.513	1.501	1.492	1.433	1.432	1.371	1.367	1.339	1.333	1.303	1.302
Max	5.531	5.523	5.488	5.481	5.402	5.395	5.346	5.320	5.265	5.229	4.990	4.982	4.739	4.717	4.489	4.459	4.291	4.278

❖ Matrice culture (grain de blé, pomme de terre)

Tableau 3.3.4-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice culture (grain de blé, pomme de terre (pdt)) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi qu'une teneur en Cd de 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
	pd ^t	blé	pd ^t	blé	pd ^t	blé	blé	pd ^t	blé	pd ^t	pd ^t	blé	blé	pd ^t	blé	pd ^t	pd ^t	blé
Moy	0.0422	0.0917	0.0419	0.0910	0.0414	0.0897	0.0891	0.0409	0.0880	0.0404	0.0392	0.0844	0.0818	0.0380	0.0793	0.0369	0.0363	0.0773
Min	0.0062	0.0045	0.0062	0.0050	0.0063	0.0058	0.0064	0.0065	0.0071	0.0066	0.0069	0.0098	0.0110	0.0073	0.0111	0.0077	0.0079	0.0113
P025	0.0135	0.0235	0.0136	0.0237	0.0137	0.0241	0.0244	0.0139	0.0247	0.0140	0.0146	0.0256	0.0263	0.0151	0.0265	0.0155	0.0158	0.0267
P05	0.0167	0.0295	0.0168	0.0297	0.0169	0.0300	0.0302	0.0170	0.0303	0.0171	0.0174	0.0308	0.0311	0.0178	0.0316	0.0180	0.0182	0.0319
P10	0.0196	0.0354	0.0197	0.0356	0.0198	0.0357	0.0358	0.0199	0.0359	0.0201	0.0204	0.0364	0.0366	0.0208	0.0368	0.0213	0.0215	0.0370
P25	0.0267	0.0511	0.0268	0.0509	0.0268	0.0506	0.0505	0.0269	0.0501	0.0270	0.0271	0.0492	0.0485	0.0271	0.0477	0.0272	0.0273	0.0470
P50	0.0373	0.0712	0.0371	0.0708	0.0368	0.0697	0.0692	0.0366	0.0681	0.0364	0.0358	0.0660	0.0642	0.0351	0.0622	0.0344	0.0339	0.0608
P75	0.0499	0.1013	0.0495	0.1004	0.0487	0.0983	0.0972	0.0481	0.0957	0.0474	0.0453	0.0910	0.0883	0.0436	0.0851	0.0420	0.0410	0.0827
P90	0.0676	0.1558	0.0670	0.1548	0.0658	0.1507	0.1486	0.0642	0.1469	0.0628	0.0592	0.1404	0.1368	0.0554	0.1324	0.0526	0.0511	0.1287
P95	0.0807	0.2043	0.0797	0.2027	0.0774	0.2000	0.1985	0.0756	0.1953	0.0737	0.0689	0.1850	0.1776	0.0654	0.1717	0.0616	0.0594	0.1667
P975	0.0989	0.3005	0.0938	0.2989	0.0909	0.2957	0.2937	0.0886	0.2907	0.0876	0.0831	0.2817	0.2714	0.0784	0.2591	0.0748	0.0722	0.2496
P99	0.1466	0.5006	0.1454	0.4908	0.1424	0.4751	0.4678	0.1375	0.4587	0.1351	0.1303	0.4237	0.3938	0.1220	0.3698	0.1159	0.1116	0.3567
Max	0.4055	2.4640	0.4030	2.4441	0.3978	2.4043	2.3819	0.3929	2.3443	0.3875	0.3731	2.2132	2.1010	0.3564	1.9862	0.3406	0.3301	1.8890

❖ Matrice lixiviât

Tableau 3.3.4-3. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.ha⁻¹) modélisées dans la matrice sol lixiviât de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi qu'une teneur en Cd de 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2410	2160	2389	2133	2336	2082	2062	2292	2028	2243	2139	1922	1834	2041	1762	1949	1901	1708
Min	99	84	111	90	117	95	70	95	97	105	84	92	86	130	127	116	145	139
P025	374	326	388	331	380	333	333	382	337	393	399	361	368	424	385	431	447	380
P05	471	415	482	422	479	425	435	486	431	498	502	451	451	514	471	531	540	471
P10	625	554	629	552	637	559	569	638	562	642	651	589	587	673	593	675	684	606
P25	1018	915	1011	906	1031	916	912	1030	920	1031	1036	919	916	1040	916	1044	1045	933
P50	1747	1568	1758	1568	1738	1536	1554	1737	1543	1716	1688	1532	1482	1659	1446	1625	1601	1443
P75	3015	2667	2961	2659	2906	2599	2588	2836	2544	2811	2659	2384	2280	2520	2175	2396	2341	2100
P90	4638	4157	4580	4116	4471	3963	3982	4333	3848	4194	3890	3480	3280	3620	3080	3352	3256	2937
P95	6082	5545	6040	5386	5860	5222	5103	5651	4864	5410	4993	4534	4149	4533	3866	4289	4061	3607
P975	7893	7224	7914	7195	7609	6881	6383	7479	6394	6973	6281	5792	5307	5929	4861	5445	5046	4628
P99	12020	10996	11591	10810	10977	10810	9241	10503	9091	10115	9435	8443	7710	8816	7327	7712	7015	6705
Max	71030	60215	48915	37009	41444	37477	53847	76104	49072	49558	47804	29416	34495	41942	31450	41993	42866	32226

3.4 Résultats obtenus à l'issue de la modélisation liée à un itinéraire rotation pomme de terre-blé-blé avec un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans en fonction de la teneur en Cd testée dans l'intrant (scénarios 13 à 16) et du temps de projection de la simulation

3.4.1 Scénario 13 : [Cd] engrais phosphatée = 90 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.4.1-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 90 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.308	0.307	0.309	0.308	0.312	0.311	0.312	0.315	0.315	0.317	0.325	0.325	0.331	0.334	0.340	0.342	0.347	0.346
Min	0.013	0.012	0.015	0.015	0.020	0.020	0.022	0.024	0.026	0.028	0.041	0.041	0.050	0.054	0.051	0.054	0.055	0.050
P025	0.073	0.073	0.076	0.076	0.081	0.081	0.083	0.086	0.087	0.090	0.101	0.101	0.107	0.110	0.114	0.116	0.119	0.117
P05	0.090	0.089	0.093	0.092	0.097	0.097	0.098	0.102	0.103	0.105	0.115	0.114	0.122	0.124	0.129	0.130	0.133	0.131
P10	0.111	0.110	0.113	0.112	0.117	0.117	0.118	0.121	0.122	0.125	0.133	0.133	0.140	0.142	0.147	0.148	0.152	0.150
P25	0.148	0.147	0.149	0.149	0.153	0.152	0.154	0.157	0.158	0.160	0.167	0.167	0.174	0.176	0.182	0.184	0.188	0.186
P50	0.213	0.213	0.216	0.215	0.220	0.219	0.220	0.224	0.225	0.228	0.239	0.239	0.248	0.251	0.258	0.261	0.268	0.267
P75	0.343	0.342	0.344	0.343	0.347	0.346	0.347	0.350	0.350	0.352	0.365	0.365	0.379	0.382	0.390	0.393	0.403	0.401
P90	0.574	0.574	0.575	0.575	0.578	0.577	0.579	0.581	0.582	0.585	0.593	0.593	0.601	0.604	0.614	0.616	0.623	0.622
P95	0.854	0.853	0.853	0.852	0.854	0.854	0.851	0.853	0.852	0.854	0.853	0.853	0.834	0.833	0.832	0.833	0.837	0.836
P975	1.135	1.135	1.135	1.134	1.133	1.133	1.131	1.131	1.126	1.123	1.091	1.090	1.057	1.058	1.055	1.055	1.045	1.042
P99	1.434	1.430	1.420	1.417	1.399	1.399	1.397	1.396	1.394	1.393	1.385	1.384	1.369	1.370	1.359	1.358	1.344	1.342
Max	5.538	5.528	5.498	5.489	5.422	5.416	5.367	5.346	5.305	5.279	5.074	5.069	4.866	4.849	4.653	4.629	4.488	4.475

❖ Matrice culture (grain de blé, pomme de terre)

Tableau 3.4.1-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice culture (grain de blé, pomme de terre (pdt)) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 90 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
	pd	blé	pd	blé	pd	blé	blé	pd	blé	pd	pd	blé	blé	pd	blé	pd	pd	blé
Moy	0.0424	0.0913	0.0426	0.0916	0.0429	0.0923	0.0924	0.0433	0.0933	0.0436	0.0445	0.0956	0.0971	0.0455	0.0994	0.0464	0.0469	0.1006
Min	0.0064	0.0052	0.0066	0.0063	0.0070	0.0084	0.0093	0.0073	0.0114	0.0076	0.0086	0.0148	0.0169	0.0096	0.0194	0.0103	0.0108	0.0215
P025	0.0137	0.0239	0.0140	0.0248	0.0146	0.0266	0.0272	0.0153	0.0286	0.0157	0.0170	0.0329	0.0362	0.0185	0.0401	0.0199	0.0207	0.0425
P05	0.0171	0.0303	0.0173	0.0311	0.0177	0.0325	0.0332	0.0182	0.0349	0.0186	0.0197	0.0394	0.0427	0.0209	0.0467	0.0221	0.0230	0.0493
P10	0.0200	0.0362	0.0203	0.0371	0.0209	0.0390	0.0396	0.0214	0.0413	0.0220	0.0234	0.0461	0.0500	0.0249	0.0542	0.0262	0.0269	0.0571
P25	0.0273	0.0514	0.0277	0.0523	0.0283	0.0538	0.0544	0.0289	0.0561	0.0295	0.0312	0.0607	0.0641	0.0327	0.0680	0.0341	0.0349	0.0703
P50	0.0374	0.0713	0.0378	0.0719	0.0384	0.0732	0.0734	0.0391	0.0747	0.0397	0.0412	0.0783	0.0810	0.0430	0.0846	0.0445	0.0456	0.0866
P75	0.0500	0.0993	0.0503	0.0996	0.0507	0.1000	0.0999	0.0513	0.1007	0.0518	0.0530	0.1020	0.1032	0.0541	0.1061	0.0551	0.0558	0.1074
P90	0.0673	0.1507	0.0672	0.1506	0.0669	0.1510	0.1501	0.0667	0.1502	0.0666	0.0662	0.1492	0.1492	0.0658	0.1502	0.0655	0.0654	0.1503
P95	0.0810	0.1973	0.0802	0.1968	0.0791	0.1966	0.1960	0.0779	0.1956	0.0776	0.0756	0.1925	0.1903	0.0739	0.1894	0.0726	0.0717	0.1866
P975	0.0962	0.2942	0.0946	0.2939	0.0929	0.2872	0.2840	0.0915	0.2838	0.0899	0.0875	0.2829	0.2793	0.0850	0.2670	0.0827	0.0810	0.2628
P99	0.1591	0.4810	0.1571	0.4787	0.1534	0.4669	0.4651	0.1493	0.4581	0.1456	0.1357	0.4232	0.3929	0.1286	0.3754	0.1218	0.1190	0.3642
Max	0.4059	2.4660	0.4036	2.4479	0.3990	2.4144	2.3914	0.3945	2.3626	0.3905	0.3782	2.2534	2.1599	0.3645	2.0617	0.3511	0.3424	1.9795

❖ Matrice lixiviat

Tableau 3.4.1-3. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.ha⁻¹) modélisées dans la matrice lixiviat le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 90 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2394	2156	2420	2158	2431	2178	2200	2443	2211	2471	2512	2246	2284	2560	2324	2614	2632	2351
Min	68	89	118	93	124	119	114	140	127	150	146	134	93	194	172	210	169	185
P025	388	333	377	350	407	361	365	426	369	433	489	437	464	527	493	562	589	527
P05	489	431	493	439	512	459	461	536	476	547	611	531	573	650	604	690	716	632
P10	649	576	653	576	675	599	607	702	619	720	763	680	717	812	758	857	890	788
P25	1036	926	1060	938	1087	965	969	1114	1000	1137	1211	1066	1126	1265	1176	1327	1362	1204
P50	1761	1576	1787	1581	1824	1634	1641	1875	1679	1907	2005	1790	1865	2112	1957	2211	2277	2032
P75	2966	2667	2980	2658	3013	2674	2718	3048	2771	3088	3197	2878	2915	3267	3008	3384	3417	3036
P90	4612	4156	4561	4148	4596	4172	4144	4543	4212	4653	4675	4128	4165	4669	4149	4622	4630	4181
P95	6080	5478	6087	5386	5919	5538	5458	5841	5309	5917	5766	5160	5174	5695	5076	5664	5580	5105
P975	7933	7374	7886	7280	7694	7187	7053	7695	6833	7661	7210	6486	6346	7050	6187	6846	6730	6088
P99	12308	10706	12269	10979	11813	9936	11026	11546	10474	10900	10856	9190	9042	10048	8529	9401	9186	8265
Max	50788	43509	59227	64604	62845	35941	57925	48658	44199	47164	42260	41997	35110	41374	35658	38099	44902	27518

3.4.2 Scénario 14 : [Cd] engrais phosphatée = 60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.4.2-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.315	0.314	0.315	0.314	0.315	0.314	0.313	0.315	0.314	0.315	0.314	0.314	0.313	0.315	0.314	0.315	0.316	0.314
Min	0.012	0.012	0.013	0.013	0.017	0.017	0.018	0.020	0.021	0.023	0.032	0.032	0.039	0.041	0.038	0.039	0.040	0.039
P025	0.073	0.072	0.074	0.074	0.077	0.076	0.077	0.079	0.079	0.080	0.085	0.084	0.087	0.088	0.089	0.090	0.091	0.090
P05	0.089	0.089	0.091	0.090	0.092	0.092	0.092	0.094	0.094	0.095	0.100	0.099	0.101	0.103	0.103	0.104	0.105	0.103
P10	0.110	0.110	0.111	0.110	0.112	0.111	0.111	0.113	0.113	0.114	0.117	0.117	0.119	0.121	0.121	0.122	0.122	0.121
P25	0.146	0.145	0.147	0.146	0.147	0.147	0.146	0.148	0.148	0.149	0.151	0.150	0.151	0.152	0.152	0.153	0.153	0.152
P50	0.214	0.213	0.215	0.215	0.216	0.216	0.216	0.217	0.217	0.218	0.222	0.221	0.223	0.225	0.226	0.227	0.228	0.227
P75	0.349	0.348	0.350	0.349	0.349	0.348	0.346	0.347	0.345	0.346	0.349	0.349	0.355	0.356	0.358	0.359	0.363	0.362
P90	0.607	0.607	0.608	0.607	0.610	0.610	0.610	0.612	0.611	0.612	0.607	0.604	0.599	0.600	0.600	0.600	0.599	0.598
P95	0.859	0.859	0.858	0.858	0.855	0.855	0.853	0.854	0.853	0.852	0.842	0.841	0.831	0.831	0.822	0.822	0.814	0.812
P975	1.134	1.134	1.132	1.132	1.128	1.128	1.125	1.122	1.111	1.106	1.086	1.083	1.049	1.046	1.030	1.029	1.016	1.014
P99	1.723	1.722	1.719	1.719	1.713	1.713	1.708	1.707	1.698	1.694	1.651	1.650	1.616	1.614	1.527	1.515	1.445	1.437
Max	5.539	5.525	5.488	5.481	5.395	5.388	5.340	5.314	5.268	5.237	5.007	4.999	4.780	4.760	4.560	4.532	4.362	4.350

❖ Matrice culture (grain de blé, pomme de terre)

Tableau 3.4.2-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice culture (grain de blé, pomme de terre (pdt)) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
	pdt	blé	pdt	blé	pdt	blé	blé	pdt	blé	pdt	pdt	blé	blé	pdt	blé	pdt	pdt	blé
Moy	0.0427	0.0938	0.0426	0.0936	0.0425	0.0932	0.0928	0.0424	0.0927	0.0423	0.0421	0.0918	0.0909	0.0419	0.0906	0.0417	0.0417	0.0899
Min	0.0063	0.0049	0.0064	0.0056	0.0066	0.0071	0.0078	0.0068	0.0092	0.0070	0.0077	0.0125	0.0139	0.0084	0.0156	0.0091	0.0095	0.0170
P025	0.0132	0.0235	0.0134	0.0242	0.0140	0.0252	0.0255	0.0143	0.0265	0.0147	0.0157	0.0291	0.0308	0.0168	0.0327	0.0177	0.0182	0.0343
P05	0.0169	0.0297	0.0171	0.0302	0.0174	0.0311	0.0315	0.0176	0.0324	0.0179	0.0187	0.0351	0.0371	0.0194	0.0394	0.0201	0.0207	0.0411
P10	0.0197	0.0358	0.0198	0.0364	0.0202	0.0373	0.0376	0.0206	0.0386	0.0209	0.0218	0.0414	0.0435	0.0227	0.0457	0.0235	0.0241	0.0472
P25	0.0271	0.0511	0.0273	0.0514	0.0276	0.0522	0.0523	0.0279	0.0531	0.0282	0.0291	0.0547	0.0557	0.0301	0.0573	0.0309	0.0314	0.0582
P50	0.0372	0.0715	0.0374	0.0713	0.0377	0.0713	0.0710	0.0379	0.0712	0.0381	0.0386	0.0715	0.0719	0.0391	0.0727	0.0395	0.0399	0.0729
P75	0.0502	0.1023	0.0501	0.1019	0.0500	0.1011	0.1001	0.0498	0.0997	0.0496	0.0490	0.0973	0.0961	0.0486	0.0952	0.0482	0.0480	0.0946
P90	0.0680	0.1590	0.0676	0.1582	0.0669	0.1558	0.1538	0.0660	0.1521	0.0650	0.0626	0.1479	0.1455	0.0603	0.1428	0.0585	0.0574	0.1409
P95	0.0817	0.2043	0.0808	0.2033	0.0791	0.2015	0.1996	0.0776	0.1980	0.0765	0.0728	0.1915	0.1878	0.0695	0.1841	0.0667	0.0651	0.1801
P975	0.1044	0.3180	0.1038	0.3155	0.1004	0.3087	0.3071	0.0968	0.3051	0.0943	0.0876	0.2950	0.2862	0.0846	0.2772	0.0806	0.0783	0.2696
P99	0.1615	0.5081	0.1609	0.5063	0.1573	0.4952	0.4848	0.1509	0.4734	0.1475	0.1361	0.4492	0.4317	0.1288	0.4143	0.1221	0.1176	0.3907
Max	0.4060	2.4646	0.4030	2.4443	0.3974	2.4012	2.3790	0.3926	2.3457	0.3880	0.3741	2.2214	2.1199	0.3591	2.0188	0.3451	0.3346	1.9219

❖ Matrice lixiviat

Tableau 3.4.2-3. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.ha⁻¹) modélisées dans la matrice lixiviat le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2442	2186	2434	2192	2404	2143	2154	2389	2149	2404	2344	2106	2061	2308	2056	2281	2273	2021
Min	98	68	113	96	106	114	58	107	57	104	124	88	126	191	170	142	178	149
P025	378	331	384	328	397	350	344	401	359	416	443	388	408	467	435	486	523	456
P05	475	415	493	425	486	435	436	493	454	517	541	487	501	583	531	601	633	553
P10	638	555	639	564	644	574	580	656	597	672	701	617	650	736	675	773	787	697
P25	1036	923	1043	926	1042	940	950	1073	955	1081	1113	992	1017	1153	1045	1180	1200	1076
P50	1754	1576	1758	1586	1767	1583	1602	1813	1622	1826	1873	1645	1686	1879	1706	1927	1943	1723
P75	3029	2679	3008	2712	2996	2649	2651	2971	2653	2969	2935	2627	2586	2905	2564	2885	2896	2549
P90	4672	4273	4664	4248	4580	4113	4044	4497	4102	4453	4252	3867	3720	4106	3641	3997	3885	3472
P95	6304	5714	6154	5563	6006	5408	5290	5841	5304	5893	5335	4919	4623	5058	4462	4934	4778	4237
P975	8248	7523	8235	7466	7827	7048	7090	7649	7014	7593	7088	6386	6000	6347	5660	6149	5983	5438
P99	12651	11229	12254	11120	11856	10409	10714	11356	9950	11342	10214	9336	8477	9816	8650	8265	8449	7689
Max	54822	45274	50556	54674	59661	44605	54080	45981	47194	65659	44622	37217	29672	67793	38497	40060	36201	41404

3.4.3 Scénario 15 : [Cd] engrais phosphatée = 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.4.3-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.306	0.305	0.305	0.304	0.303	0.302	0.301	0.301	0.300	0.299	0.295	0.294	0.289	0.290	0.286	0.286	0.283	0.282
Min	0.011	0.012	0.013	0.013	0.015	0.015	0.017	0.018	0.019	0.020	0.027	0.027	0.026	0.029	0.029	0.030	0.027	0.025
P025	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071	0.071	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.072	0.071
P05	0.086	0.085	0.087	0.086	0.087	0.087	0.087	0.088	0.087	0.088	0.088	0.088	0.086	0.087	0.085	0.085	0.084	0.083
P10	0.109	0.108	0.108	0.107	0.107	0.107	0.106	0.107	0.106	0.107	0.107	0.106	0.103	0.104	0.102	0.102	0.100	0.099
P25	0.145	0.144	0.144	0.143	0.143	0.142	0.141	0.142	0.141	0.141	0.138	0.138	0.135	0.136	0.133	0.133	0.131	0.130
P50	0.211	0.210	0.210	0.209	0.209	0.208	0.207	0.208	0.207	0.207	0.205	0.204	0.202	0.203	0.202	0.202	0.201	0.200
P75	0.346	0.345	0.345	0.344	0.342	0.341	0.338	0.338	0.337	0.336	0.333	0.332	0.332	0.332	0.331	0.332	0.331	0.330
P90	0.571	0.571	0.570	0.569	0.568	0.567	0.565	0.566	0.565	0.565	0.561	0.560	0.554	0.554	0.550	0.550	0.543	0.542
P95	0.836	0.835	0.835	0.834	0.833	0.832	0.831	0.830	0.827	0.824	0.797	0.796	0.778	0.775	0.756	0.755	0.747	0.746
P975	1.063	1.062	1.060	1.059	1.047	1.046	1.044	1.043	1.041	1.039	1.008	1.007	0.980	0.979	0.962	0.959	0.944	0.943
P99	1.432	1.431	1.426	1.425	1.415	1.414	1.387	1.386	1.382	1.379	1.360	1.359	1.338	1.336	1.314	1.311	1.290	1.288
Max	5.533	5.524	5.495	5.487	5.409	5.400	5.348	5.324	5.277	5.246	5.027	5.021	4.794	4.775	4.563	4.536	4.370	4.358

❖ Matrice culture (grain de blé, pomme de terre)

Tableau 3.4.3-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice culture (grain de blé, pomme de terre (pdt)) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
	pdt	blé	pdt	blé	pdt	blé	blé	pdt	blé	pdt	pdt	blé	blé	pdt	blé	pdt	pdt	blé
Moy	0.0420	0.0913	0.0418	0.0908	0.0414	0.0898	0.0890	0.0411	0.0884	0.0407	0.0397	0.0855	0.0832	0.0388	0.0814	0.0380	0.0376	0.0796
Min	0.0062	0.0048	0.0063	0.0054	0.0064	0.0066	0.0071	0.0066	0.0082	0.0067	0.0072	0.0116	0.0129	0.0076	0.0142	0.0081	0.0084	0.0131
P025	0.0131	0.0222	0.0132	0.0225	0.0135	0.0232	0.0231	0.0138	0.0237	0.0141	0.0150	0.0254	0.0263	0.0156	0.0277	0.0162	0.0166	0.0281
P05	0.0168	0.0291	0.0169	0.0294	0.0170	0.0297	0.0299	0.0172	0.0303	0.0173	0.0177	0.0310	0.0319	0.0182	0.0331	0.0186	0.0189	0.0337
P10	0.0193	0.0355	0.0195	0.0357	0.0197	0.0359	0.0359	0.0199	0.0363	0.0201	0.0206	0.0374	0.0381	0.0212	0.0390	0.0217	0.0220	0.0391
P25	0.0268	0.0504	0.0269	0.0505	0.0272	0.0505	0.0502	0.0272	0.0502	0.0273	0.0276	0.0499	0.0496	0.0278	0.0497	0.0281	0.0283	0.0493
P50	0.0370	0.0703	0.0370	0.0699	0.0369	0.0692	0.0684	0.0368	0.0680	0.0368	0.0364	0.0664	0.0652	0.0361	0.0642	0.0357	0.0356	0.0632
P75	0.0496	0.0999	0.0493	0.0992	0.0485	0.0976	0.0965	0.0480	0.0953	0.0475	0.0458	0.0912	0.0889	0.0444	0.0868	0.0432	0.0424	0.0845
P90	0.0662	0.1527	0.0654	0.1510	0.0641	0.1484	0.1472	0.0632	0.1451	0.0620	0.0588	0.1399	0.1362	0.0556	0.1330	0.0531	0.0516	0.1293
P95	0.0798	0.1960	0.0786	0.1955	0.0765	0.1924	0.1911	0.0745	0.1890	0.0729	0.0684	0.1830	0.1756	0.0646	0.1695	0.0614	0.0595	0.1657
P975	0.1018	0.2938	0.0970	0.2930	0.0918	0.2821	0.2812	0.0892	0.2800	0.0882	0.0844	0.2698	0.2579	0.0797	0.2447	0.0757	0.0732	0.2316
P99	0.1510	0.5014	0.1481	0.4994	0.1435	0.4844	0.4719	0.1411	0.4663	0.1368	0.1313	0.4295	0.3992	0.1248	0.3736	0.1184	0.1129	0.3482
Max	0.4056	2.4644	0.4033	2.4472	0.3982	2.4070	2.3829	0.3932	2.3496	0.3885	0.3753	2.2312	2.1263	0.3600	2.0200	0.3454	0.3350	1.9260

❖ Matrice lixiviat

Tableau 3.4.3-3. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.ha⁻¹) modélisées dans la matrice lixiviat le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2406	2133	2388	2123	2330	2102	2070	2297	2049	2259	2179	1961	1888	2107	1823	2039	1990	1761
Min	106	92	102	94	118	48	115	115	62	114	125	77	118	120	96	114	164	80
P025	363	315	367	332	377	336	340	389	347	397	417	366	380	423	395	445	454	400
P05	463	414	473	411	477	424	427	482	437	494	512	454	465	518	481	543	557	489
P10	627	547	636	563	635	560	555	639	571	638	660	584	593	680	613	690	701	621
P25	1017	902	1026	909	1019	915	908	1032	911	1033	1046	932	950	1055	955	1069	1087	955
P50	1726	1544	1741	1543	1724	1531	1536	1718	1521	1712	1709	1526	1507	1710	1502	1689	1679	1480
P75	2942	2616	2915	2609	2868	2552	2519	2858	2508	2798	2649	2405	2326	2600	2234	2478	2418	2159
P90	4591	4055	4486	4077	4346	3924	3916	4289	3784	4111	3956	3540	3331	3688	3153	3498	3322	2991
P95	6075	5398	5970	5420	5687	5271	5113	5571	4936	5385	4972	4554	4175	4620	3928	4374	4109	3743
P975	8010	7238	7831	7000	7578	6962	6902	7270	6491	7054	6388	5868	5472	5934	5065	5554	5236	4733
P99	12433	11291	12733	10820	11572	10809	10370	11073	10308	11151	10100	8567	8323	9061	7379	8634	8028	6854
Max	64077	54952	56514	42699	50012	51973	64393	47291	46363	50740	50205	41893	45129	70893	47847	41211	58267	32934

3.4.4 Scénario 16 : [Cd] engrais phosphatée = 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.4.4-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.310	0.309	0.308	0.307	0.304	0.303	0.300	0.300	0.297	0.296	0.286	0.285	0.276	0.276	0.267	0.266	0.261	0.260
Min	0.011	0.011	0.011	0.011	0.012	0.012	0.013	0.013	0.014	0.014	0.017	0.017	0.019	0.020	0.016	0.017	0.016	0.015
P025	0.071	0.070	0.070	0.070	0.069	0.068	0.067	0.067	0.066	0.066	0.061	0.061	0.055	0.056	0.052	0.052	0.050	0.050
P05	0.084	0.083	0.083	0.082	0.082	0.082	0.081	0.081	0.080	0.080	0.074	0.073	0.069	0.069	0.064	0.065	0.061	0.060
P10	0.107	0.106	0.105	0.105	0.103	0.103	0.101	0.100	0.099	0.099	0.093	0.093	0.086	0.087	0.081	0.080	0.077	0.076
P25	0.146	0.145	0.144	0.143	0.140	0.139	0.137	0.137	0.135	0.135	0.127	0.126	0.119	0.119	0.112	0.112	0.107	0.106
P50	0.212	0.212	0.211	0.211	0.208	0.207	0.205	0.205	0.204	0.203	0.196	0.195	0.188	0.188	0.182	0.181	0.177	0.176
P75	0.348	0.347	0.347	0.346	0.342	0.341	0.338	0.336	0.333	0.332	0.321	0.321	0.315	0.315	0.310	0.309	0.303	0.302
P90	0.573	0.573	0.570	0.570	0.567	0.566	0.565	0.564	0.563	0.561	0.553	0.552	0.541	0.541	0.532	0.530	0.523	0.522
P95	0.854	0.854	0.852	0.851	0.845	0.845	0.842	0.841	0.835	0.830	0.809	0.808	0.779	0.777	0.752	0.750	0.737	0.735
P975	1.141	1.140	1.134	1.133	1.121	1.120	1.111	1.106	1.095	1.092	1.034	1.033	1.003	1.001	0.973	0.970	0.942	0.941
P99	1.441	1.440	1.435	1.435	1.424	1.424	1.417	1.413	1.408	1.401	1.375	1.375	1.344	1.340	1.304	1.296	1.263	1.261
Max	5.531	5.525	5.486	5.479	5.409	5.402	5.353	5.329	5.279	5.247	5.023	5.017	4.794	4.773	4.561	4.531	4.376	4.366

❖ Matrice culture (grain de blé, pomme de terre)

Tableau 3.4.4-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice culture (grain de blé, pomme de terre (pdt)) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
	pdt	blé	pdt	blé	pdt	blé	blé	pdt	blé	pdt	pdt	blé	blé	pdt	blé	pdt	pdt	blé
Moy	0.0424	0.0923	0.0420	0.0914	0.0413	0.0897	0.0886	0.0406	0.0873	0.0399	0.0381	0.0824	0.0785	0.0363	0.0750	0.0348	0.0339	0.0721
Min	0.0062	0.0045	0.0062	0.0047	0.0063	0.0051	0.0053	0.0064	0.0057	0.0064	0.0067	0.0072	0.0082	0.0069	0.0094	0.0072	0.0073	0.0081
P025	0.0130	0.0226	0.0130	0.0226	0.0131	0.0226	0.0224	0.0132	0.0225	0.0134	0.0139	0.0221	0.0218	0.0142	0.0216	0.0146	0.0146	0.0213
P05	0.0167	0.0294	0.0167	0.0293	0.0167	0.0291	0.0290	0.0167	0.0287	0.0168	0.0170	0.0275	0.0266	0.0170	0.0265	0.0171	0.0171	0.0257
P10	0.0195	0.0353	0.0195	0.0352	0.0195	0.0348	0.0346	0.0195	0.0345	0.0196	0.0196	0.0334	0.0323	0.0196	0.0315	0.0196	0.0196	0.0303
P25	0.0268	0.0509	0.0267	0.0505	0.0267	0.0494	0.0490	0.0266	0.0484	0.0265	0.0261	0.0459	0.0440	0.0257	0.0421	0.0252	0.0247	0.0405
P50	0.0371	0.0709	0.0368	0.0703	0.0364	0.0687	0.0675	0.0360	0.0665	0.0356	0.0343	0.0628	0.0595	0.0329	0.0566	0.0316	0.0308	0.0545
P75	0.0500	0.1005	0.0494	0.0991	0.0483	0.0966	0.0954	0.0474	0.0934	0.0465	0.0439	0.0881	0.0840	0.0414	0.0798	0.0395	0.0383	0.0765
P90	0.0679	0.1576	0.0671	0.1557	0.0656	0.1512	0.1485	0.0637	0.1462	0.0620	0.0577	0.1385	0.1330	0.0537	0.1271	0.0506	0.0487	0.1227
P95	0.0815	0.2036	0.0804	0.2026	0.0781	0.1995	0.1972	0.0758	0.1947	0.0736	0.0680	0.1834	0.1747	0.0633	0.1678	0.0593	0.0570	0.1614
P975	0.1029	0.3090	0.0983	0.3075	0.0918	0.3045	0.3029	0.0889	0.2960	0.0882	0.0843	0.2820	0.2725	0.0789	0.2630	0.0751	0.0715	0.2494
P99	0.1614	0.5075	0.1589	0.4993	0.1520	0.4805	0.4710	0.1458	0.4621	0.1405	0.1312	0.4359	0.4069	0.1231	0.3763	0.1163	0.1109	0.3598
Max	0.4055	2.4647	0.4029	2.4433	0.3982	2.4077	2.3850	0.3934	2.3507	0.3886	0.3750	2.2293	2.1267	0.3599	2.0190	0.3450	0.3354	1.9296

❖ Matrice lixiviât

Tableau 3.4.4-3. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.ha⁻¹) modélisées dans la matrice lixiviât le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi qu'une teneur en Cd de 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ dans l'intrant

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2423	2173	2374	2149	2341	2091	2055	2272	2003	2215	2060	1852	1744	1939	1635	1818	1743	1557
Min	115	64	115	78	79	79	86	102	75	105	121	103	87	116	129	121	96	120
P025	372	327	379	321	372	331	330	382	328	384	384	346	344	393	338	405	406	355
P05	470	426	476	427	470	417	421	477	413	472	479	430	432	482	425	498	494	438
P10	629	556	633	562	625	551	552	629	549	625	631	555	554	630	557	624	623	560
P25	1033	911	1018	903	1015	907	905	1022	895	1006	994	882	861	977	857	970	951	847
P50	1754	1567	1735	1552	1717	1527	1514	1696	1510	1656	1591	1417	1369	1538	1309	1471	1431	1264
P75	3011	2697	2939	2621	2861	2563	2502	2788	2458	2712	2544	2248	2109	2362	1957	2179	2084	1869
P90	4651	4251	4550	4164	4432	3965	3902	4260	3767	4141	3753	3399	3130	3451	2849	3157	2969	2669
P95	6148	5689	6038	5456	5930	5321	5148	5566	4994	5458	4867	4396	4036	4413	3664	4093	3726	3400
P975	8217	7630	8092	7459	7788	7019	6829	7314	6485	7080	6327	5808	5235	5771	4684	5395	4835	4367
P99	12333	11196	12006	11081	11980	10658	10594	11225	9740	10334	9683	8347	8012	8641	7271	8041	7566	6657
Max	50925	48211	45120	49718	41537	40288	36893	60987	63255	50435	43789	37149	33641	41051	52346	29996	36268	34590

3.5 Résultats obtenus à l'issue de la modélisation liée à un itinéraire monoculture blé avec un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ en fonction de concentrations en Cd dégressives (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ (en accord avec le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE) testées dans l'intrant (scénario 17) et du temps de projection de la simulation

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.5-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.309	0.310	0.311	0.311	0.312	0.312	0.313	0.313	0.312	0.311	0.307	0.307	0.303	0.303	0.300	0.300	0.297	0.297
Min	0.011	0.012	0.013	0.013	0.016	0.017	0.018	0.019	0.020	0.020	0.024	0.024	0.024	0.024	0.026	0.026	0.024	0.024
P025	0.071	0.072	0.073	0.073	0.075	0.076	0.078	0.078	0.078	0.078	0.076	0.076	0.074	0.074	0.072	0.072	0.070	0.070
P05	0.086	0.087	0.088	0.089	0.091	0.092	0.093	0.093	0.092	0.092	0.091	0.091	0.089	0.089	0.087	0.087	0.085	0.085
P10	0.109	0.110	0.111	0.111	0.112	0.113	0.114	0.113	0.113	0.112	0.110	0.110	0.107	0.106	0.104	0.103	0.101	0.101
P25	0.146	0.146	0.147	0.148	0.148	0.148	0.150	0.149	0.149	0.148	0.145	0.145	0.141	0.141	0.138	0.137	0.135	0.135
P50	0.212	0.212	0.214	0.214	0.216	0.216	0.217	0.217	0.217	0.216	0.215	0.215	0.213	0.213	0.211	0.211	0.209	0.209
P75	0.346	0.347	0.348	0.348	0.349	0.349	0.350	0.349	0.348	0.347	0.345	0.345	0.345	0.345	0.343	0.344	0.344	0.343
P90	0.572	0.572	0.573	0.574	0.575	0.576	0.577	0.577	0.577	0.577	0.576	0.576	0.574	0.574	0.573	0.572	0.572	0.572
P95	0.846	0.846	0.847	0.847	0.846	0.846	0.845	0.845	0.843	0.843	0.825	0.824	0.814	0.812	0.792	0.791	0.783	0.783
P975	1.112	1.113	1.113	1.113	1.114	1.114	1.114	1.113	1.112	1.111	1.076	1.074	1.048	1.048	1.037	1.035	1.016	1.015
P99	1.572	1.570	1.568	1.567	1.560	1.559	1.552	1.549	1.542	1.537	1.501	1.500	1.463	1.461	1.417	1.416	1.397	1.394
Max	5.532	5.525	5.506	5.497	5.446	5.440	5.405	5.396	5.360	5.337	5.186	5.179	5.006	4.996	4.826	4.811	4.678	4.661

❖ Matrice culture (grain de blé)

Tableau 3.5-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice culture (grain de blé) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.0927	0.0929	0.0931	0.0931	0.0932	0.0933	0.0934	0.0932	0.0927	0.0924	0.0903	0.0902	0.0882	0.0881	0.0864	0.0863	0.0851	0.0849
Min	0.0045	0.0049	0.0054	0.0057	0.0068	0.0070	0.0079	0.0080	0.0084	0.0086	0.0102	0.0103	0.0120	0.0120	0.0129	0.0130	0.0135	0.0136
P025	0.0230	0.0235	0.0240	0.0241	0.0248	0.0249	0.0256	0.0256	0.0257	0.0258	0.0262	0.0262	0.0268	0.0269	0.0274	0.0274	0.0280	0.0279
P05	0.0295	0.0299	0.0304	0.0306	0.0313	0.0314	0.0319	0.0319	0.0321	0.0321	0.0326	0.0326	0.0329	0.0330	0.0335	0.0335	0.0336	0.0336
P10	0.0354	0.0357	0.0362	0.0365	0.0373	0.0374	0.0381	0.0381	0.0382	0.0382	0.0386	0.0386	0.0390	0.0390	0.0392	0.0391	0.0391	0.0391
P25	0.0511	0.0514	0.0518	0.0520	0.0525	0.0526	0.0532	0.0532	0.0530	0.0530	0.0523	0.0523	0.0516	0.0516	0.0510	0.0509	0.0505	0.0504
P50	0.0708	0.0711	0.0713	0.0714	0.0718	0.0719	0.0720	0.0718	0.0713	0.0710	0.0694	0.0693	0.0682	0.0682	0.0671	0.0670	0.0663	0.0662
P75	0.1005	0.1006	0.1010	0.1009	0.1008	0.1008	0.1006	0.1004	0.0997	0.0994	0.0959	0.0958	0.0934	0.0934	0.0917	0.0915	0.0902	0.0900
P90	0.1525	0.1525	0.1521	0.1519	0.1508	0.1507	0.1503	0.1502	0.1495	0.1491	0.1455	0.1452	0.1421	0.1421	0.1405	0.1404	0.1389	0.1386
P95	0.2032	0.2033	0.2035	0.2034	0.2034	0.2031	0.2022	0.2016	0.1998	0.1992	0.1932	0.1930	0.1900	0.1899	0.1858	0.1853	0.1815	0.1814
P975	0.3191	0.3190	0.3185	0.3183	0.3163	0.3161	0.3154	0.3149	0.3136	0.3129	0.3068	0.3064	0.2993	0.2983	0.2885	0.2877	0.2842	0.2824
P99	0.5228	0.5215	0.5142	0.5121	0.5054	0.5037	0.4985	0.4977	0.4902	0.4874	0.4633	0.4629	0.4445	0.4437	0.4227	0.4213	0.4119	0.4112
Max	2.4679	2.4645	2.4560	2.4518	2.4279	2.4251	2.4092	2.4051	2.3884	2.3774	2.3075	2.3045	2.2243	2.2197	2.1415	2.1344	2.0730	2.0653

❖ Matrice lixiviat

Tableau 3.5-3. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd ($\text{mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant ($60 \text{ mg Cd}\cdot\text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ sur les trois premières années d'apport → $40 \text{ mg Cd}\cdot\text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ pendant 12 ans → $20 \text{ mg Cd}\cdot\text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$)

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2170	2176	2165	2171	2190	2178	2166	2169	2137	2133	2057	2044	1990	1974	1915	1916	1885	1866
Min	70	105	103	88	92	82	93	85	92	94	112	73	110	109	102	107	102	110
P025	322	324	328	327	342	341	351	350	347	353	367	360	379	382	386	384	393	401
P05	417	410	419	429	437	431	436	441	447	451	458	450	470	467	480	480	482	492
P10	558	556	557	566	580	570	584	581	585	587	600	599	608	601	616	627	623	638
P25	903	916	920	922	935	939	954	946	953	935	958	958	974	959	976	969	985	989
P50	1570	1579	1588	1587	1596	1603	1613	1604	1599	1609	1602	1578	1569	1564	1551	1557	1540	1551
P75	2652	2671	2672	2646	2689	2686	2656	2686	2638	2643	2537	2522	2438	2421	2348	2344	2316	2269
P90	4173	4125	4146	4145	4103	4078	4078	4098	4052	4021	3789	3764	3548	3552	3389	3393	3305	3205
P95	5614	5532	5492	5549	5418	5482	5486	5353	5238	5184	4922	4904	4609	4581	4302	4369	4230	4097
P975	7421	7348	7220	7259	7472	7195	7162	7023	6816	6836	6254	6319	5989	5960	5622	5722	5439	5207
P99	11509	11011	11417	11211	11227	10946	10693	10756	10567	10508	9271	9633	9263	9168	8192	7912	7965	7515
Max	45046	45921	40544	52733	58108	65402	41125	80389	49130	52037	52467	51784	39697	58639	33276	34871	51616	31720

3.6 Résultats obtenus à l'issue de la modélisation liée à un itinéraire monoculture blé avec un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans en fonction de concentrations en Cd dégressives (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ (en accord avec le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE) testées dans l'intrant (scénario 18) et du temps de projection de la simulation

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.6-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.316	0.315	0.315	0.315	0.313	0.313	0.311	0.311	0.309	0.308	0.300	0.299	0.292	0.292	0.284	0.284	0.279	0.278
Min	0.011	0.011	0.012	0.012	0.014	0.014	0.014	0.015	0.015	0.016	0.017	0.017	0.013	0.014	0.011	0.011	0.011	0.010
P025	0.071	0.071	0.071	0.071	0.072	0.071	0.070	0.071	0.070	0.069	0.064	0.064	0.058	0.058	0.054	0.053	0.050	0.050
P05	0.086	0.086	0.086	0.086	0.086	0.085	0.085	0.085	0.084	0.084	0.078	0.077	0.071	0.072	0.068	0.067	0.064	0.063
P10	0.109	0.108	0.108	0.107	0.106	0.106	0.105	0.105	0.103	0.103	0.098	0.097	0.092	0.092	0.086	0.086	0.082	0.081
P25	0.147	0.147	0.147	0.146	0.145	0.144	0.143	0.143	0.140	0.140	0.133	0.133	0.126	0.126	0.120	0.120	0.115	0.114
P50	0.214	0.213	0.213	0.213	0.213	0.212	0.211	0.211	0.210	0.209	0.204	0.203	0.197	0.197	0.192	0.191	0.187	0.187
P75	0.350	0.350	0.349	0.348	0.347	0.346	0.346	0.346	0.343	0.342	0.335	0.334	0.329	0.329	0.325	0.325	0.321	0.320
P90	0.594	0.594	0.594	0.593	0.592	0.592	0.591	0.591	0.589	0.588	0.572	0.571	0.564	0.565	0.560	0.559	0.555	0.554
P95	0.860	0.860	0.860	0.859	0.858	0.857	0.854	0.853	0.851	0.850	0.838	0.838	0.820	0.819	0.799	0.796	0.783	0.779
P975	1.163	1.161	1.160	1.160	1.158	1.156	1.151	1.150	1.145	1.143	1.116	1.114	1.090	1.089	1.067	1.065	1.046	1.044
P99	1.721	1.720	1.719	1.718	1.714	1.713	1.710	1.709	1.705	1.701	1.670	1.669	1.644	1.642	1.618	1.616	1.593	1.586
Max	5.535	5.522	5.506	5.499	5.459	5.451	5.413	5.406	5.369	5.353	5.201	5.195	5.026	5.019	4.870	4.853	4.746	4.731

❖ Matrice culture (grain de blé)

Tableau 3.6-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice culture (grain de blé) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.0940	0.0937	0.0935	0.0932	0.0926	0.0923	0.0916	0.0915	0.0906	0.0902	0.0867	0.0865	0.0832	0.0831	0.0802	0.0800	0.0779	0.0775
Min	0.0047	0.0047	0.0051	0.0051	0.0058	0.0058	0.0061	0.0063	0.0065	0.0066	0.0074	0.0074	0.0069	0.0071	0.0056	0.0058	0.0057	0.0052
P025	0.0229	0.0229	0.0231	0.0230	0.0232	0.0230	0.0230	0.0231	0.0230	0.0231	0.0224	0.0223	0.0219	0.0220	0.0208	0.0208	0.0206	0.0204
P05	0.0285	0.0285	0.0287	0.0286	0.0289	0.0287	0.0285	0.0287	0.0284	0.0282	0.0273	0.0272	0.0264	0.0265	0.0259	0.0260	0.0255	0.0252
P10	0.0354	0.0354	0.0355	0.0355	0.0357	0.0356	0.0355	0.0355	0.0351	0.0351	0.0341	0.0340	0.0327	0.0328	0.0318	0.0318	0.0310	0.0306
P25	0.0508	0.0507	0.0507	0.0506	0.0504	0.0502	0.0498	0.0499	0.0494	0.0493	0.0476	0.0474	0.0456	0.0457	0.0439	0.0437	0.0425	0.0422
P50	0.0717	0.0713	0.0713	0.0710	0.0705	0.0702	0.0696	0.0695	0.0686	0.0682	0.0655	0.0653	0.0630	0.0630	0.0603	0.0602	0.0581	0.0578
P75	0.1019	0.1015	0.1011	0.1007	0.0997	0.0994	0.0982	0.0981	0.0968	0.0964	0.0918	0.0915	0.0884	0.0884	0.0854	0.0851	0.0828	0.0824
P90	0.1584	0.1580	0.1576	0.1573	0.1555	0.1549	0.1521	0.1513	0.1496	0.1485	0.1443	0.1442	0.1399	0.1399	0.1364	0.1363	0.1338	0.1333
P95	0.2073	0.2064	0.2053	0.2043	0.2027	0.2026	0.2012	0.2009	0.1990	0.1981	0.1917	0.1910	0.1863	0.1862	0.1807	0.1805	0.1765	0.1757
P975	0.3181	0.3174	0.3164	0.3158	0.3110	0.3096	0.3075	0.3070	0.3060	0.3056	0.2978	0.2966	0.2891	0.2889	0.2826	0.2818	0.2760	0.2745
P99	0.5130	0.5110	0.5076	0.5069	0.5053	0.5039	0.4981	0.4979	0.4957	0.4932	0.4663	0.4650	0.4473	0.4464	0.4332	0.4310	0.4198	0.4168
Max	2.4696	2.4633	2.4561	2.4526	2.4343	2.4304	2.4128	2.4097	2.3923	2.3850	2.3145	2.3120	2.2335	2.2304	2.1614	2.1539	2.1044	2.0975

❖ Matrice lixiviat

Tableau 3.6-3. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd ($\text{mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) modélisées dans la matrice lixiviat le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant ($60 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ sur les trois premières années d'apport $\rightarrow 40 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ pendant 12 ans $\rightarrow 20 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$)

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2175	2160	2141	2144	2136	2112	2072	2080	2074	2030	1933	1933	1829	1811	1745	1713	1654	1645
Min	94	64	105	93	81	102	100	104	97	104	71	87	83	90	66	104	96	112
P025	331	319	331	331	338	333	336	326	333	327	341	337	345	346	345	335	352	347
P05	413	412	415	417	424	414	425	426	421	422	432	434	427	432	436	425	436	436
P10	555	551	559	554	564	550	558	562	563	560	569	563	556	560	563	557	565	562
P25	903	904	913	903	919	916	910	903	919	909	894	890	884	880	880	872	866	857
P50	1548	1538	1549	1557	1558	1550	1533	1531	1530	1511	1473	1466	1406	1416	1370	1354	1324	1319
P75	2669	2664	2614	2630	2594	2589	2543	2534	2523	2503	2350	2365	2204	2198	2093	2046	1990	1968
P90	4213	4114	4077	4067	4018	4015	3914	3890	3910	3792	3547	3519	3308	3271	3055	2989	2912	2863
P95	5643	5526	5431	5321	5410	5284	5088	5192	5150	4977	4554	4674	4275	4292	3972	3841	3719	3645
P975	7596	7276	7298	7404	7200	7028	6783	6888	6847	6547	5921	6122	5710	5413	5118	5111	4852	4852
P99	11723	10846	10696	11351	10801	11017	10743	10741	10466	10642	9107	9133	8828	8111	8304	7835	7419	7418
Max	50473	47685	60446	62081	76339	49277	42272	52458	51206	36321	68456	66160	40943	45061	54913	43926	30307	42011

3.7 Résultats obtenus à l'issue de la modélisation liée à un itinéraire monoculture rotation pomme de terre-blé-blé avec un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ en fonction de concentrations en Cd dégressives (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ (en accord avec le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE) testées dans l'intrant (scénario 19) et du temps de projection de la simulation

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.7-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.311	0.312	0.313	0.313	0.313	0.313	0.314	0.313	0.311	0.310	0.303	0.303	0.296	0.295	0.290	0.289	0.285	0.285
Min	0.011	0.012	0.014	0.014	0.017	0.018	0.020	0.021	0.022	0.022	0.025	0.025	0.022	0.022	0.022	0.021	0.022	0.022
P025	0.071	0.072	0.074	0.074	0.077	0.077	0.079	0.079	0.079	0.078	0.074	0.074	0.072	0.072	0.070	0.069	0.068	0.068
P05	0.087	0.088	0.089	0.090	0.093	0.093	0.095	0.094	0.093	0.093	0.091	0.091	0.087	0.087	0.083	0.082	0.079	0.079
P10	0.110	0.111	0.112	0.112	0.114	0.114	0.116	0.115	0.114	0.113	0.110	0.110	0.105	0.105	0.100	0.100	0.096	0.096
P25	0.146	0.147	0.148	0.149	0.150	0.150	0.151	0.151	0.149	0.148	0.142	0.142	0.138	0.137	0.132	0.132	0.128	0.128
P50	0.212	0.214	0.214	0.215	0.216	0.217	0.218	0.218	0.217	0.216	0.210	0.211	0.208	0.208	0.205	0.205	0.202	0.202
P75	0.347	0.348	0.349	0.350	0.349	0.349	0.349	0.347	0.346	0.345	0.340	0.340	0.338	0.337	0.334	0.333	0.331	0.332
P90	0.575	0.576	0.576	0.577	0.577	0.578	0.579	0.578	0.577	0.575	0.570	0.571	0.564	0.563	0.558	0.558	0.554	0.554
P95	0.853	0.853	0.852	0.853	0.852	0.852	0.853	0.851	0.849	0.843	0.832	0.832	0.816	0.814	0.792	0.788	0.776	0.775
P975	1.171	1.172	1.171	1.171	1.157	1.157	1.150	1.142	1.129	1.122	1.088	1.087	1.046	1.041	1.008	1.004	0.991	0.991
P99	1.576	1.575	1.568	1.568	1.557	1.557	1.551	1.546	1.539	1.532	1.477	1.476	1.397	1.394	1.368	1.364	1.348	1.347
Max	5.532	5.526	5.486	5.478	5.412	5.405	5.359	5.332	5.281	5.250	5.008	5.000	4.769	4.747	4.524	4.496	4.324	4.311

❖ Matrice culture (grain de blé, pomme de terre)

Tableau 3.7-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice culture (grain de blé, pomme de terre (pdt)) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
	pdt	blé	pdt	blé	pdt	blé	blé	pdt	blé	pdt	pdt	blé	blé	pdt	blé	pdt	pdt	blé
Moy	0.0421	0.0925	0.0423	0.0927	0.0423	0.0925	0.0926	0.0422	0.0914	0.0417	0.0403	0.0874	0.0846	0.0389	0.0818	0.0378	0.0371	0.0796
Min	0.0062	0.0050	0.0064	0.0060	0.0066	0.0076	0.0087	0.0068	0.0093	0.0069	0.0072	0.0115	0.0114	0.0076	0.0113	0.0079	0.0082	0.0116
P025	0.0129	0.0233	0.0133	0.0242	0.0139	0.0253	0.0260	0.0143	0.0260	0.0145	0.0151	0.0264	0.0268	0.0156	0.0269	0.0160	0.0163	0.0274
P05	0.0163	0.0298	0.0168	0.0306	0.0172	0.0317	0.0323	0.0175	0.0324	0.0175	0.0179	0.0326	0.0327	0.0182	0.0328	0.0185	0.0187	0.0328
P10	0.0193	0.0359	0.0198	0.0368	0.0201	0.0378	0.0385	0.0204	0.0385	0.0205	0.0208	0.0387	0.0385	0.0212	0.0383	0.0215	0.0217	0.0382
P25	0.0268	0.0514	0.0273	0.0519	0.0276	0.0528	0.0533	0.0279	0.0529	0.0279	0.0280	0.0514	0.0503	0.0279	0.0492	0.0279	0.0278	0.0483
P50	0.0374	0.0710	0.0378	0.0713	0.0381	0.0718	0.0719	0.0383	0.0708	0.0381	0.0371	0.0679	0.0661	0.0362	0.0639	0.0355	0.0349	0.0625
P75	0.0493	0.1009	0.0496	0.1009	0.0496	0.1005	0.1004	0.0495	0.0988	0.0486	0.0466	0.0932	0.0902	0.0445	0.0870	0.0429	0.0419	0.0848
P90	0.0675	0.1567	0.0674	0.1568	0.0667	0.1543	0.1532	0.0655	0.1495	0.0637	0.0598	0.1430	0.1390	0.0561	0.1340	0.0531	0.0513	0.1299
P95	0.0808	0.2066	0.0801	0.2045	0.0787	0.2031	0.2027	0.0775	0.1993	0.0763	0.0706	0.1896	0.1826	0.0665	0.1749	0.0631	0.0607	0.1696
P975	0.1043	0.3024	0.1037	0.2988	0.0989	0.2968	0.2958	0.0948	0.2928	0.0913	0.0867	0.2843	0.2741	0.0813	0.2638	0.0774	0.0747	0.2492
P99	0.1585	0.5020	0.1565	0.5002	0.1506	0.4920	0.4862	0.1430	0.4706	0.1375	0.1304	0.4516	0.4239	0.1224	0.4000	0.1167	0.1115	0.3813
Max	0.4056	2.4651	0.4028	2.4428	0.3984	2.4093	2.3878	0.3936	2.3515	0.3887	0.3741	2.2219	2.1149	0.3583	2.0021	0.3429	0.3322	1.9040

❖ Matrice lixiviât

Tableau 3.7-3. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg. ha⁻¹) modélisées dans la matrice lixiviât le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2377	2152	2381	2152	2379	2142	2162	2378	2111	2327	2203	1986	1892	2083	1812	1982	1942	1750
Min	89	105	111	62	101	72	95	100	104	124	147	126	118	147	112	150	153	126
P025	369	320	384	340	393	346	348	407	366	409	420	369	378	429	383	449	457	400
P05	466	412	477	429	497	441	447	508	452	510	519	463	476	528	482	542	557	482
P10	624	557	636	570	639	576	588	662	591	664	675	603	602	677	616	694	699	618
P25	1023	913	1041	926	1060	939	951	1067	958	1078	1068	957	956	1068	950	1066	1055	958
P50	1751	1554	1778	1596	1785	1602	1620	1803	1618	1798	1760	1567	1536	1703	1501	1667	1655	1474
P75	2897	2631	2937	2643	2951	2652	2635	2953	2607	2863	2743	2410	2332	2560	2240	2439	2368	2151
P90	4511	4131	4482	4077	4442	4045	4102	4437	3942	4308	3958	3629	3380	3611	3173	3376	3281	2987
P95	6112	5480	5946	5394	5872	5366	5462	5826	5200	5644	5072	4695	4312	4652	3948	4266	4099	3764
P975	8182	7360	8070	7203	7875	7220	7232	7834	6755	7336	6645	6191	5469	6062	5040	5444	5290	4791
P99	12176	11173	11528	10794	11598	10953	10916	11485	10327	10539	9947	9017	7799	8820	7351	7845	7578	6958
Max	54983	41961	49894	44865	43521	37027	44256	61853	45174	56199	42774	34454	52045	38301	36146	36100	34032	33579

3.8 Résultats obtenus à l'issue de la modélisation liée à un itinéraire monoculture rotation pomme de terre-blé-blé avec un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans en fonction de concentrations en Cd dégressives (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ (en accord avec le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE) testées dans l'intrant (scénario 20) et du temps de projection de la simulation

❖ Matrice sol agricole

Tableau 3.8-1. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	0.316	0.316	0.315	0.315	0.313	0.312	0.311	0.310	0.307	0.306	0.295	0.295	0.285	0.284	0.275	0.274	0.268	0.267
Min	0.012	0.012	0.013	0.013	0.015	0.015	0.016	0.017	0.017	0.017	0.020	0.020	0.015	0.016	0.015	0.016	0.014	0.013
P025	0.074	0.074	0.075	0.074	0.076	0.075	0.075	0.075	0.074	0.074	0.068	0.067	0.062	0.062	0.057	0.056	0.054	0.053
P05	0.090	0.090	0.090	0.090	0.091	0.090	0.090	0.090	0.088	0.087	0.082	0.082	0.075	0.075	0.070	0.069	0.066	0.065
P10	0.112	0.111	0.111	0.111	0.110	0.110	0.109	0.109	0.107	0.106	0.100	0.099	0.093	0.093	0.086	0.086	0.081	0.080
P25	0.147	0.147	0.147	0.146	0.145	0.145	0.144	0.143	0.142	0.141	0.133	0.132	0.125	0.125	0.118	0.118	0.113	0.112
P50	0.215	0.214	0.215	0.214	0.214	0.213	0.212	0.212	0.211	0.210	0.202	0.202	0.195	0.195	0.189	0.189	0.184	0.183
P75	0.352	0.351	0.351	0.350	0.349	0.348	0.347	0.347	0.345	0.343	0.334	0.334	0.326	0.326	0.320	0.319	0.315	0.314
P90	0.587	0.583	0.582	0.581	0.581	0.580	0.579	0.578	0.577	0.576	0.565	0.564	0.556	0.556	0.548	0.547	0.538	0.537
P95	0.852	0.852	0.850	0.850	0.847	0.847	0.842	0.841	0.837	0.835	0.819	0.818	0.789	0.787	0.760	0.758	0.747	0.746
P975	1.163	1.162	1.159	1.158	1.151	1.150	1.140	1.131	1.119	1.115	1.070	1.070	1.019	1.018	0.983	0.973	0.945	0.943
P99	1.722	1.722	1.716	1.714	1.599	1.582	1.545	1.540	1.531	1.525	1.464	1.462	1.408	1.399	1.339	1.335	1.298	1.295
Max	5.535	5.526	5.492	5.482	5.406	5.401	5.348	5.321	5.274	5.239	4.998	4.992	4.755	4.732	4.504	4.475	4.305	4.290

❖ Matrice culture (grain de blé, pomme de terre)

Tableau 3.8-2. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.kg⁻¹) modélisées dans la matrice culture (grain de blé, pomme de terre (pdt)) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
	pdt	blé	pdt	blé	pdt	blé	blé	pdt	blé	pdt	pdt	blé	blé	pdt	blé	pdt	pdt	blé
Moy	0.0426	0.0947	0.0423	0.0941	0.0419	0.0930	0.0922	0.0414	0.0908	0.0407	0.0388	0.0855	0.0814	0.0370	0.0776	0.0354	0.0344	0.0745
Min	0.0063	0.0050	0.0063	0.0054	0.0065	0.0064	0.0068	0.0066	0.0072	0.0067	0.0069	0.0086	0.0078	0.0071	0.0077	0.0073	0.0074	0.0067
P025	0.0131	0.0238	0.0132	0.0241	0.0134	0.0247	0.0249	0.0135	0.0251	0.0138	0.0141	0.0246	0.0239	0.0144	0.0232	0.0146	0.0148	0.0225
P05	0.0169	0.0303	0.0170	0.0305	0.0172	0.0309	0.0311	0.0172	0.0309	0.0172	0.0173	0.0298	0.0286	0.0173	0.0278	0.0174	0.0175	0.0271
P10	0.0197	0.0356	0.0198	0.0358	0.0199	0.0362	0.0363	0.0201	0.0361	0.0201	0.0201	0.0350	0.0338	0.0202	0.0330	0.0202	0.0202	0.0321
P25	0.0269	0.0514	0.0270	0.0514	0.0271	0.0513	0.0511	0.0271	0.0503	0.0270	0.0267	0.0476	0.0456	0.0261	0.0436	0.0256	0.0252	0.0417
P50	0.0370	0.0715	0.0369	0.0712	0.0368	0.0705	0.0698	0.0366	0.0685	0.0362	0.0349	0.0646	0.0612	0.0334	0.0586	0.0321	0.0314	0.0560
P75	0.0499	0.1019	0.0497	0.1010	0.0490	0.0994	0.0982	0.0481	0.0965	0.0471	0.0444	0.0899	0.0860	0.0419	0.0822	0.0398	0.0385	0.0787
P90	0.0676	0.1557	0.0671	0.1536	0.0657	0.1505	0.1488	0.0638	0.1469	0.0623	0.0581	0.1394	0.1341	0.0540	0.1288	0.0506	0.0486	0.1242
P95	0.0813	0.2042	0.0803	0.2031	0.0781	0.2009	0.1986	0.0764	0.1965	0.0740	0.0685	0.1850	0.1765	0.0636	0.1684	0.0594	0.0572	0.1623
P975	0.1034	0.3415	0.0994	0.3393	0.0926	0.3326	0.3145	0.0904	0.3113	0.0883	0.0839	0.2955	0.2851	0.0785	0.2739	0.0743	0.0713	0.2599
P99	0.1635	0.5212	0.1614	0.5081	0.1588	0.4989	0.4917	0.1545	0.4818	0.1514	0.1394	0.4488	0.4285	0.1280	0.4018	0.1205	0.1166	0.3763
Max	0.4057	2.4650	0.4032	2.4450	0.3981	2.4072	2.3825	0.3930	2.3483	0.3881	0.3736	2.2180	2.1087	0.3574	1.9929	0.3416	0.3310	1.8946

❖ Matrice lixiviat

Tableau 3.8-3. Présentation de la distribution et la moyenne des concentrations en Cd (mg.ha⁻¹) modélisées dans la matrice lixiviat le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	Annee 1	Annee 2	Annee 4	Annee 5	Annee 10	Annee 11	Annee 15	Annee 16	Annee 20	Annee 22	Annee 40	Annee 41	Annee 60	Annee 61	Annee 80	Annee 82	Annee 97	Annee 99
Moy	2439	2191	2425	2171	2385	2119	2096	2326	2060	2285	2121	1895	1782	1973	1675	1859	1770	1601
Min	107	104	97	84	87	102	108	122	97	116	93	76	106	136	72	132	123	131
P025	372	337	386	333	379	335	344	390	343	394	396	351	358	398	365	411	414	363
P05	483	422	478	420	476	429	427	488	430	491	497	440	440	495	442	504	503	442
P10	632	558	637	561	628	575	563	643	568	655	650	576	568	645	570	641	641	565
P25	1021	906	1021	913	1027	918	909	1029	911	1025	1010	892	875	995	866	976	963	850
P50	1719	1542	1731	1548	1740	1537	1525	1715	1509	1706	1618	1451	1383	1561	1328	1488	1446	1280
P75	2933	2647	2923	2605	2898	2572	2523	2830	2486	2769	2576	2278	2129	2364	1990	2207	2100	1892
P90	4618	4179	4568	4119	4406	3927	3889	4262	3838	4165	3801	3401	3082	3446	2900	3201	2978	2716
P95	6236	5497	6069	5496	5805	5165	5185	5545	5062	5450	4879	4448	4017	4382	3723	4084	3734	3452
P975	8368	7359	8257	7504	7944	7060	6966	7570	6644	7385	6481	5865	5239	5729	4744	5342	4990	4577
P99	14098	11863	13241	11622	12472	11264	10778	12166	10289	11492	10323	8976	8860	9334	7371	8493	7712	7341
Max	51761	67894	54796	44772	77049	59989	61111	51998	58957	52412	51394	40349	66615	54318	57153	41648	33667	35964

Annexe 4 : Tables et figures des pourcentages de variation (sur la base des distributions et de la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans les matrices sol - culture (pommes de terre, blé (grain)) – lixivié par rapport à la première année d'apport de référence et en fonction de l'itinéraire de fertilisation et des teneurs en Cd testées dans l'engrais minéral phosphaté

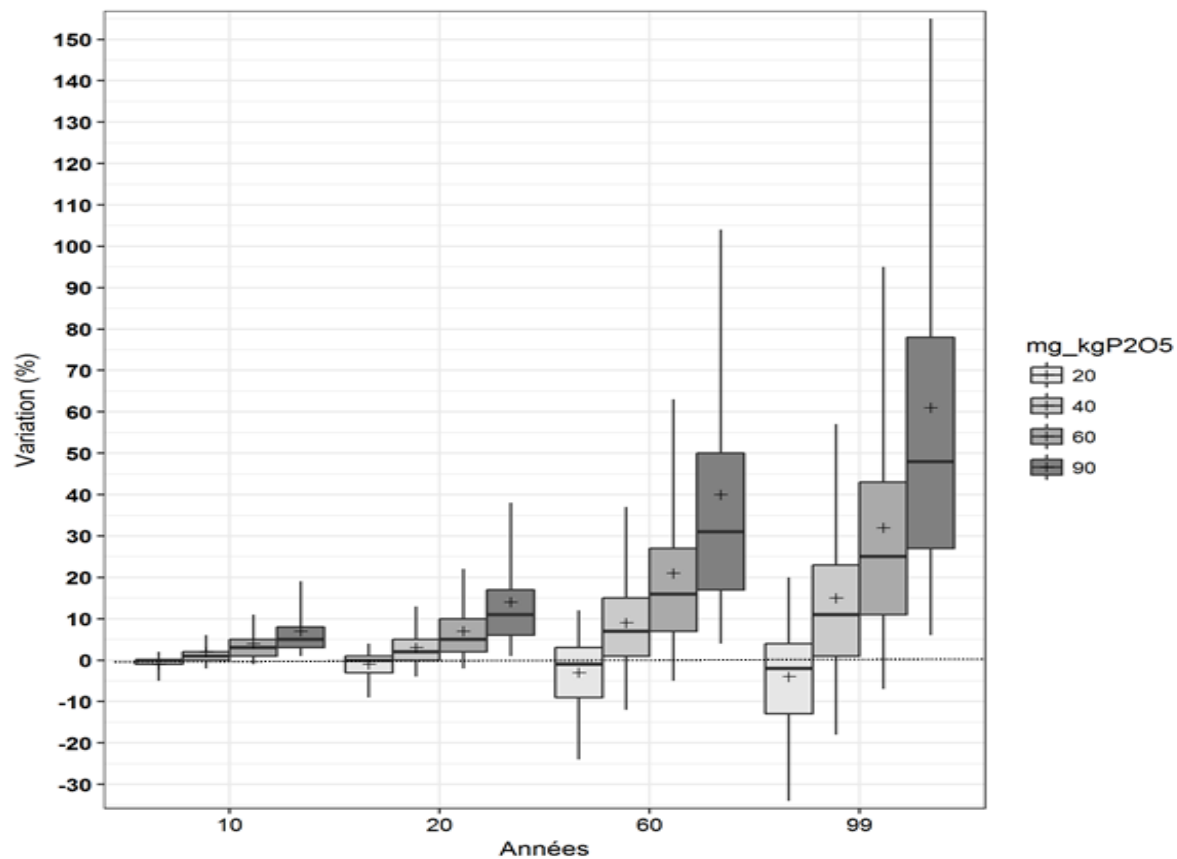
4.1 Résultats obtenus à l'issue de la modélisation liée à un itinéraire monoculture blé avec un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ en fonction de la teneur en Cd testée dans l'intrant (scénarios 1 à 4) et du temps de projection de la simulation

❖ Matrice sol agricole

Tableau 4.1-1. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) de l'accumulation du Cd dans le sol en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

	T10ans				T20ans				T60ans				T99ans			
	90 mg.kg P2O5	60 mg.kg P2O5	40 mg.kg P2O5	20 mg.kg P2O5	90 mg.kg P2O5	60 mg.kg P2O5	40 mg.kg P2O5	20 mg.kg P2O5	90 mg.kg P2O5	60 mg.kg P2O5	40 mg.kg P2O5	20 mg.kg P2O5	90 mg.kg P2O5	60 mg.kg P2O5	40 mg.kg P2O5	20 mg.kg P2O5
Moy	7	4	2	-1	14	7	3	-1	40	21	9	-3	61	32	15	-4
Min	-13	-14	-20	-28	-26	-27	-37	-48	-47	-51	-64	-75	-59	-56	-76	-84
P025	0	-2	-3	-6	0	-3	-7	-13	-1	-10	-18	-31	-2	-14	-25	-43
P05	1	-1	-2	-5	1	-2	-4	-9	4	-5	-12	-24	6	-7	-18	-34
P10	1	0	-1	-3	3	0	-2	-6	8	1	-6	-17	12	1	-9	-25
P25	3	1	0	-1	6	2	0	-3	17	7	1	-9	27	11	1	-13
P50	5	3	1	0	11	5	2	0	31	16	7	-1	48	25	11	-2
P75	8	5	2	0	17	10	5	1	50	27	15	3	78	43	23	4
P90	14	8	4	1	28	16	9	3	79	45	26	8	120	70	41	12
P95	19	11	6	2	38	22	13	4	104	63	37	12	155	95	57	20
P975	24	14	8	3	49	29	17	6	134	80	49	18	197	124	76	29
P99	33	19	12	5	67	38	24	10	176	105	67	28	253	157	103	44
Max	224	224	111	49	443	432	226	99	1050	860	536	241	1394	1083	729	333

Figure 4.1-1. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) de l'accumulation du Cd dans le sol en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 80 kg P₂O₅ .ha⁻¹.an⁻¹ et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

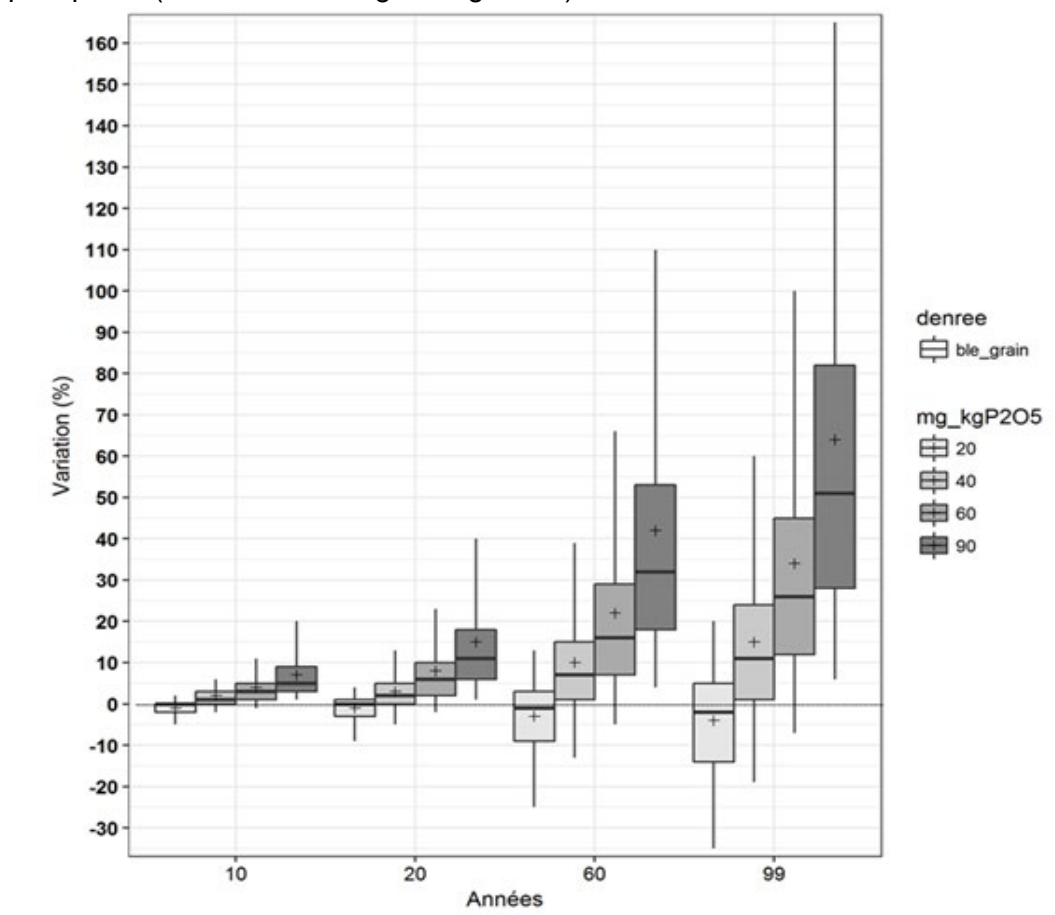


❖ Matrice culture (grain de blé)

Tableau 4.1-2. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) du transfert du Cd vers le grain de blé en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 80 kg P₂O₅ .ha⁻¹.an⁻¹ et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

	T10ans				T20ans				T60ans				T99ans			
	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg
Moy	7	4	2	-1	15	8	3	-1	42	22	10	-3	64	34	15	-4
Min	-14	-14	-21	-29	-27	-27	-38	-49	-49	-52	-65	-76	-60	-58	-77	-85
P025	0	-2	-4	-7	0	-4	-7	-13	-1	-10	-19	-32	-2	-14	-26	-44
P05	1	-1	-2	-5	1	-2	-5	-9	4	-5	-13	-25	6	-7	-19	-35
P10	1	0	-1	-3	3	0	-2	-6	8	1	-6	-18	13	1	-9	-26
P25	3	1	0	-2	6	2	0	-3	18	7	1	-9	28	12	1	-14
P50	5	3	1	0	11	6	2	0	32	16	7	-1	51	26	11	-2
P75	9	5	3	0	18	10	5	1	53	29	15	3	82	45	24	5
P90	14	8	5	1	30	16	9	3	83	48	27	8	127	73	43	13
P95	20	11	6	2	40	23	13	4	110	66	39	13	165	100	60	20
P975	25	15	9	3	51	31	18	6	142	85	51	19	210	131	80	30
P99	34	20	12	5	70	40	25	10	187	111	70	29	272	167	108	46
Max	240	240	117	51	481	469	242	105	1168	951	585	258	1565	1205	802	360

Figure 4.1-2. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) du transfert du Cd vers le grain de blé en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 80 kg P₂O₅ .ha⁻¹.an⁻¹ et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

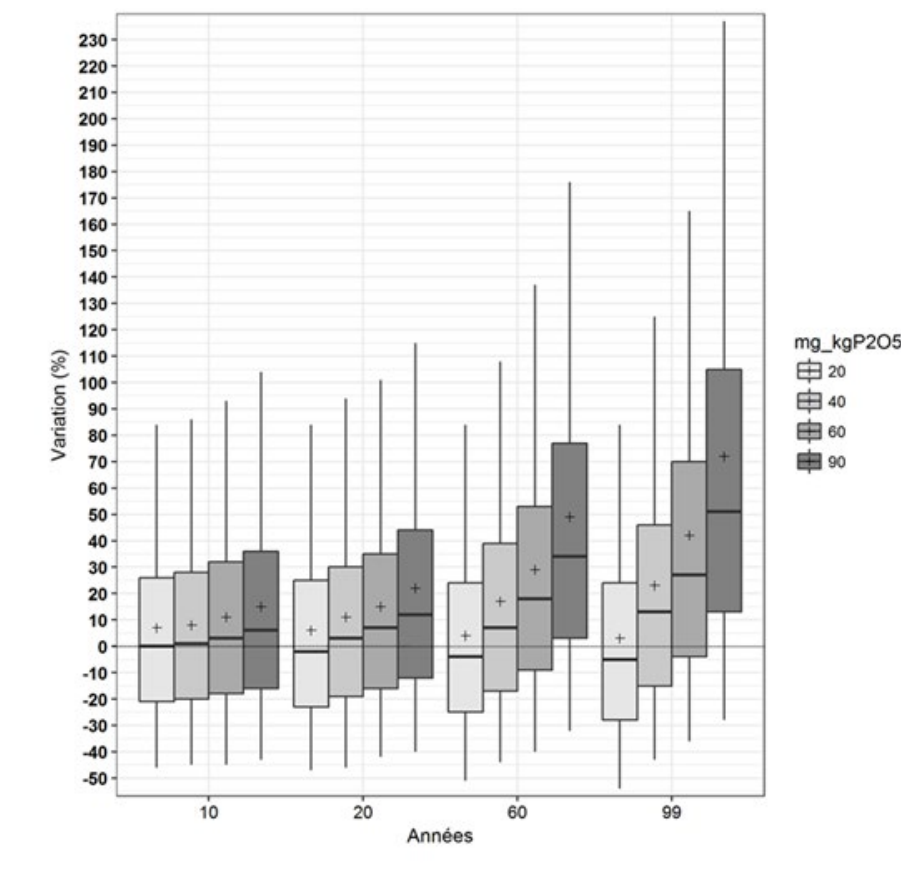


❖ Matrice lixiviat

Tableau 4.1-3. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) du transfert du Cd vers le lixiviat en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 80 kg P₂O₅.ha⁻¹.an⁻¹ et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

	T10ans				T20ans				T60ans				T99ans			
	90 mg Cd. kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd. kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd. kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd. kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg
Moy	15	11	8	7	22	15	11	6	49	29	17	4	72	42	23	3
Min	-79	-81	-82	-80	-80	-80	-84	-80	-78	-80	-81	-92	-81	-83	-83	-95
P025	-50	-52	-52	-53	-48	-50	-53	-54	-40	-48	-52	-57	-37	-45	-52	-60
P05	-43	-45	-45	-46	-40	-42	-46	-47	-32	-40	-44	-51	-28	-36	-43	-54
P10	-34	-35	-36	-37	-30	-33	-36	-38	-20	-29	-35	-41	-13	-25	-34	-45
P25	-16	-18	-20	-21	-12	-16	-19	-23	3	-9	-17	-25	13	-4	-15	-28
P50	6	3	1	0	12	7	3	-2	34	18	7	-4	51	27	13	-5
P75	36	32	28	26	44	35	30	25	77	53	39	24	105	70	46	24
P90	73	67	61	58	82	71	66	57	134	99	77	56	178	123	92	58
P95	104	93	86	84	115	101	94	84	176	137	108	84	237	165	125	84
P975	133	124	111	110	151	128	120	110	224	176	144	116	302	215	167	112
P99	174	159	156	149	197	170	161	150	300	235	188	155	414	289	234	153
Max	429	763	597	469	553	519	650	473	929	702	621	739	2436	2040	1560	484

Figure 4.1-3. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) du transfert du Cd vers le lixiviat en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 80 kg P₂O₅ .ha⁻¹.an⁻¹ et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)



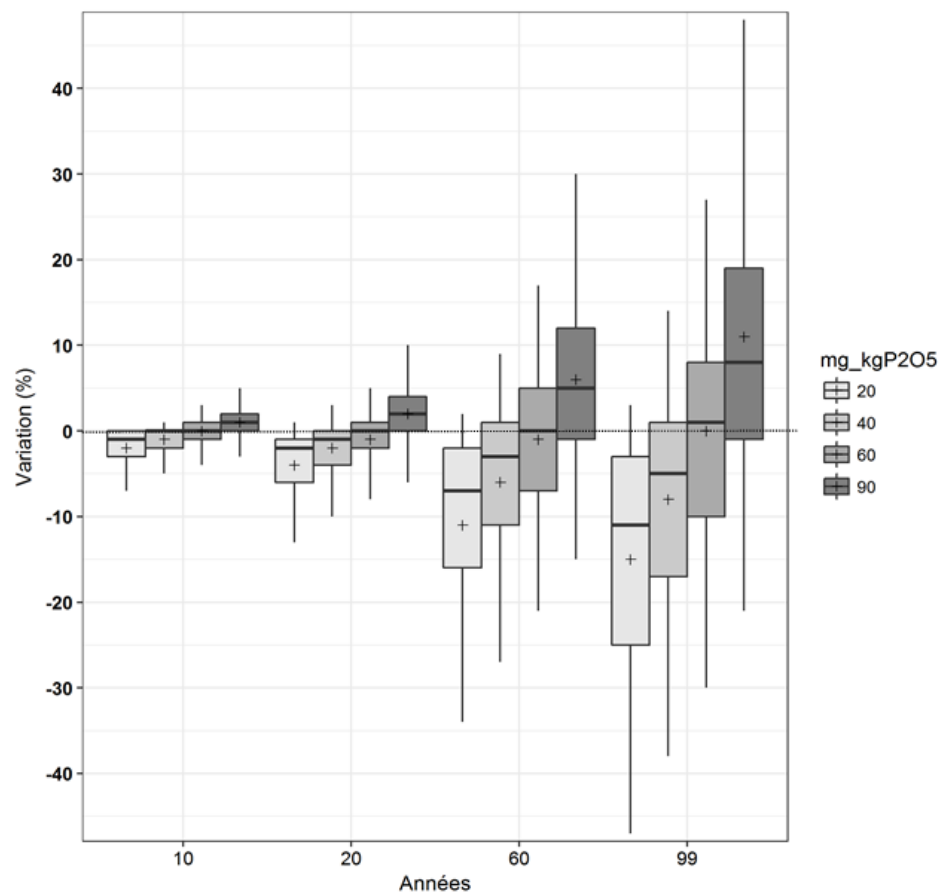
4.2 Résultats obtenus à l'issue de la modélisation liée à un itinéraire monoculture blé avec un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans en fonction de la teneur en Cd testée dans l'intrant (scénarios 5 à 8) et du temps de projection de la simulation

❖ Matrice sol agricole

Tableau 4.2-1. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) de l'accumulation du Cd dans le sol en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 100 kg P₂O₅.ha⁻¹an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

	T10ans				T20ans				T60ans				T99ans			
	90 mg.kg P2O5	60 mg.kg P2O5	40 mg.kg P2O5	20 mg.kg P2O5	90 mg.kg P2O5	60 mg.kg P2O5	40 mg.kg P2O5	20 mg.kg P2O5	90 mg.kg P2O5	60 mg.kg P2O5	40 mg.kg P2O5	20 mg.kg P2O5	90 mg.kg P2O5	60 mg.kg P2O5	40 mg.kg P2O5	20 mg.kg P2O5
Moy	1	0	-1	-2	2	-1	-2	-4	6	-1	-6	-11	11	0	-8	-15
Min	-38	-40	-37	-37	-53	-64	-60	-62	-67	-75	-83	-88	-70	-80	-84	-91
P025	-4	-5	-6	-9	-8	-11	-13	-17	-21	-28	-33	-42	-29	-38	-45	-56
P05	-3	-4	-5	-7	-6	-8	-10	-13	-15	-21	-27	-34	-21	-30	-38	-47
P10	-1	-3	-4	-5	-3	-6	-7	-10	-9	-15	-20	-26	-13	-22	-29	-38
P25	0	-1	-2	-3	0	-2	-4	-6	-1	-7	-11	-16	-1	-10	-17	-25
P50	1	0	0	-1	2	0	-1	-2	5	0	-3	-7	8	1	-5	-11
P75	2	1	0	0	4	1	0	-1	12	5	1	-2	19	8	1	-3
P90	4	2	1	0	7	4	2	0	22	11	5	0	34	18	8	0
P95	5	3	1	0	10	5	3	1	30	17	9	2	48	27	14	3
P975	7	4	2	1	14	8	5	1	41	24	14	4	64	38	23	6
P99	10	6	3	1	20	13	6	3	57	37	20	8	90	58	33	13
Max	63	40	70	15	120	77	126	28	316	215	229	81	449	315	258	115

Figure 4.2-1. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) de l'accumulation du Cd dans le sol en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 100 kg P₂O₅ .ha⁻¹.an⁻¹ avec un temps d'impassé de 2 ans et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

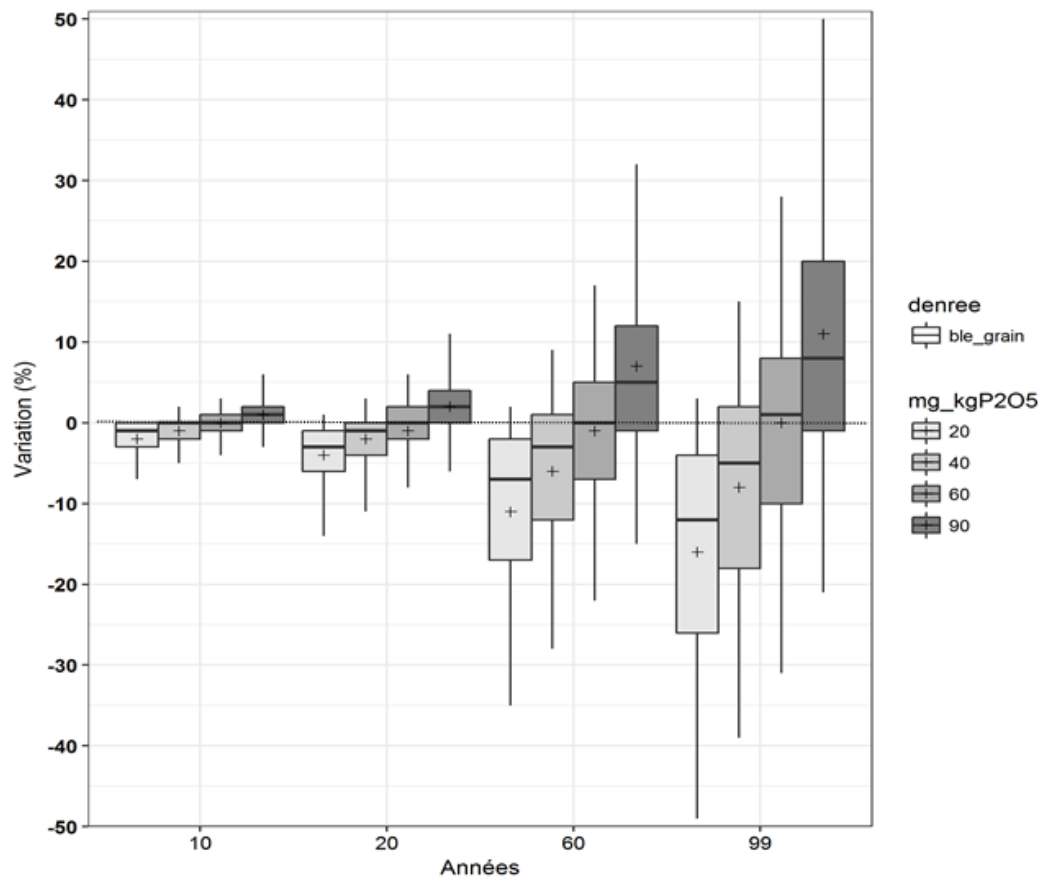


❖ Matrice culture (grain de blé)

Tableau 4.2-2. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) du transfert du Cd vers le grain de blé en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 100 kg P₂O₅ .ha⁻¹an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

	T10ans				T20ans				T60ans				T99ans			
	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg
Moy	1	0	-1	-2	2	-1	-2	-4	7	-1	-6	-11	11	0	-8	-16
Min	-39	-41	-38	-38	-55	-66	-61	-63	-69	-76	-84	-89	-71	-81	-85	-92
P025	-4	-6	-7	-9	-8	-11	-14	-18	-22	-29	-34	-43	-30	-39	-46	-57
P05	-3	-4	-5	-7	-6	-8	-11	-14	-15	-22	-28	-35	-21	-31	-39	-49
P10	-1	-3	-4	-5	-3	-6	-8	-10	-9	-16	-21	-27	-13	-23	-30	-39
P25	0	-1	-2	-3	0	-2	-4	-6	-1	-7	-12	-17	-1	-10	-18	-26
P50	1	0	0	-1	2	0	-1	-3	5	0	-3	-7	8	1	-5	-12
P75	2	1	0	0	4	2	0	-1	12	5	1	-2	20	8	2	-4
P90	4	2	1	0	7	4	2	0	22	11	5	0	36	19	9	0
P95	6	3	2	0	11	6	3	1	32	17	9	2	50	28	15	3
P975	8	4	2	1	15	8	5	1	43	25	14	4	67	40	24	6
P99	11	7	4	1	21	13	7	3	60	39	21	8	95	61	34	13
Max	66	42	73	16	128	81	134	29	340	230	245	85	488	339	277	122

Figure 4.2-2. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) du transfert du Cd vers le grain de blé en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 100 kg P₂O₅.ha⁻¹.an⁻¹ avec un temps d'impassé de 2 ans et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

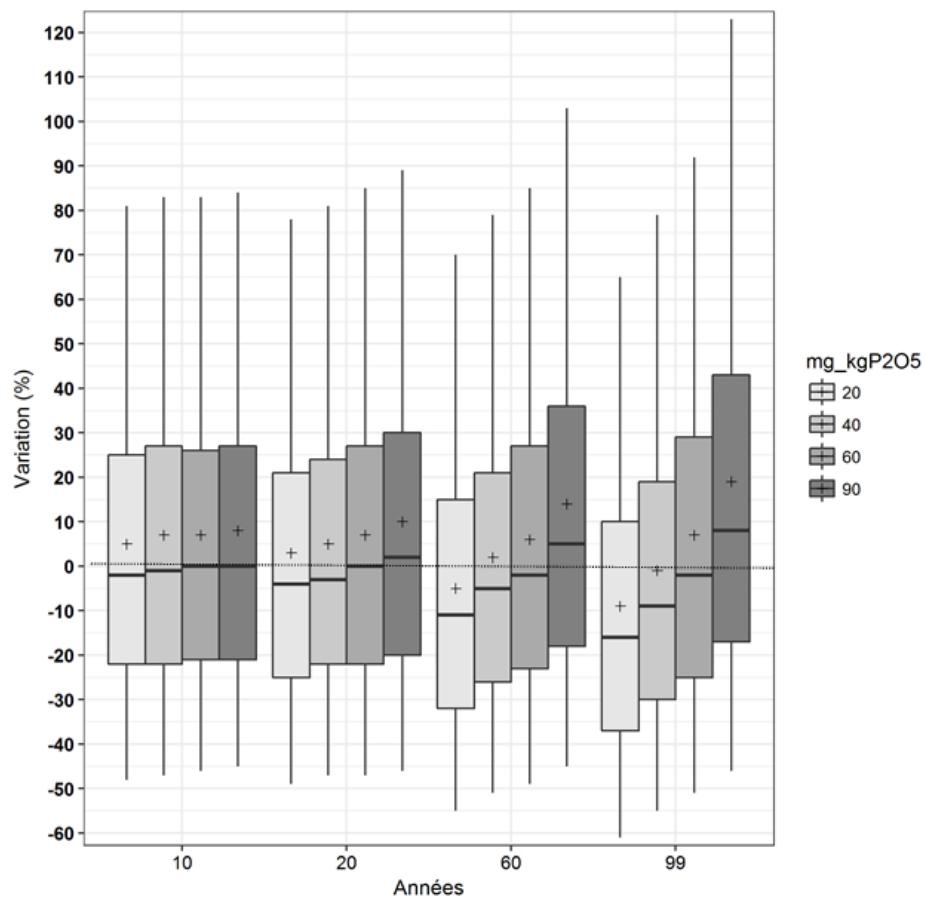


❖ Matrice lixiviat

Tableau 4.2-3. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) du transfert du Cd vers le lixiviat en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 100 kg P₂O₅ .ha⁻¹an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

	T10ans				T20ans				T60ans				T99ans			
	90 mg Cd. kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd. kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd. kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd. kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg
Moy	8	7	7	5	10	7	5	3	14	6	2	-5	19	7	-1	-9
Min	-78	-80	-80	-83	-82	-77	-81	-78	-77	-83	-91	-92	-83	-85	-88	-93
P025	-52	-52	-53	-55	-53	-54	-54	-55	-53	-55	-58	-62	-53	-58	-61	-67
P05	-45	-46	-47	-48	-46	-47	-47	-49	-45	-49	-51	-55	-46	-51	-55	-61
P10	-36	-37	-38	-39	-37	-39	-38	-40	-36	-40	-43	-47	-36	-43	-46	-53
P25	-21	-21	-22	-22	-20	-22	-22	-25	-18	-23	-26	-32	-17	-25	-30	-37
P50	0	0	-1	-2	2	0	-3	-4	5	-2	-5	-11	8	-2	-9	-16
P75	27	26	27	25	30	27	24	21	36	27	21	15	43	29	19	10
P90	60	59	59	57	63	59	57	52	74	60	55	46	85	64	52	41
P95	84	83	83	81	89	85	81	78	103	85	79	70	123	92	79	65
P975	114	108	109	109	118	114	107	104	134	113	107	93	155	124	107	92
P99	148	146	143	150	154	159	151	148	183	154	137	128	210	167	148	131
Max	307	377	397	419	538	422	518	404	466	381	471	342	882	620	358	355

Figure 4.2-3. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) du transfert du Cd vers le lixiviat en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation monoculture blé 100 kg P₂O₅ .ha⁻¹.an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)



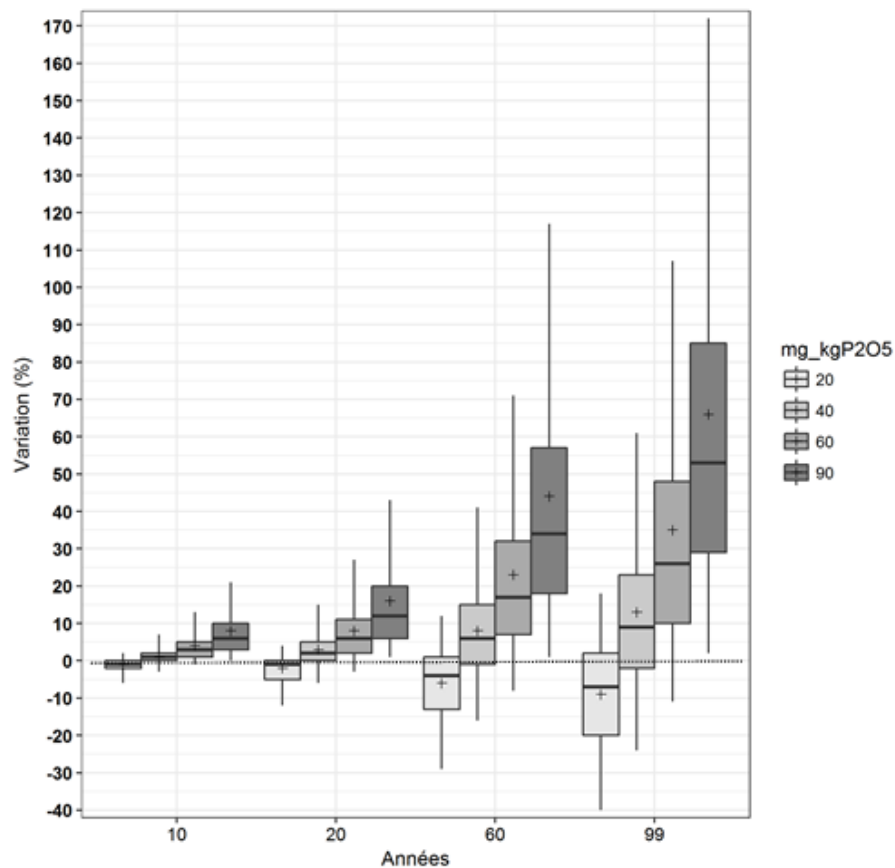
4.3 Résultats obtenus à l'issue de la modélisation liée à un itinéraire rotation pomme de terre/blé/blé avec un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ en fonction de la teneur en Cd testée dans l'intrant (scénarios 9 à 12) et du temps de projection de la simulation

❖ Matrice sol agricole

Tableau 4.3-1. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) de l'accumulation du Cd dans le sol en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation rotation pomme de terre/blé/blé 100 kg P₂O₅.ha⁻¹an⁻¹ et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

	T10ans				T20ans				T60ans				T99ans			
	90 mg.kg P2O5	60 mg.kg P2O5	40 mg.kg P2O5	20 mg.kg P2O5	90 mg.kg P2O5	60 mg.kg P2O5	40 mg.kg P2O5	20 mg.kg P2O5	90 mg.kg P2O5	60 mg.kg P2O5	40 mg.kg P2O5	20 mg.kg P2O5	90 mg.kg P2O5	60 mg.kg P2O5	40 mg.kg P2O5	20 mg.kg P2O5
Moy	8	4	1	-1	16	8	3	-2	44	23	8	-6	66	35	13	-9
Min	-21	-24	-22	-55	-26	-32	-37	-67	-47	-57	-64	-78	-58	-65	-72	-84
P025	-1	-3	-5	-8	-2	-5	-9	-15	-4	-14	-23	-35	-7	-20	-32	-48
P05	0	-1	-3	-6	1	-3	-6	-12	1	-8	-16	-29	2	-11	-24	-40
P10	1	0	-2	-4	3	0	-4	-9	7	-2	-10	-23	11	-2	-15	-33
P25	3	1	0	-2	6	2	0	-5	18	7	-1	-13	29	10	-2	-20
P50	6	3	1	-1	12	6	2	-1	34	17	6	-4	53	26	9	-7
P75	10	5	2	0	20	11	5	0	57	32	15	1	85	48	23	2
P90	16	9	5	1	32	19	10	2	88	53	28	7	130	80	43	11
P95	21	13	7	2	43	27	15	4	117	71	41	12	172	107	61	18
P975	27	17	10	3	55	35	20	6	147	94	55	18	217	141	84	29
P99	37	24	14	5	74	48	28	10	193	128	75	29	279	190	114	43
Max	312	152	222	51	584	299	392	104	1144	741	610	253	1424	977	715	352

Figure 4.3-1. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) de l'accumulation du Cd dans le sol en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation rotation pomme de terre/blé/blé 100 kg P₂O₅ .ha⁻¹.an⁻¹ et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

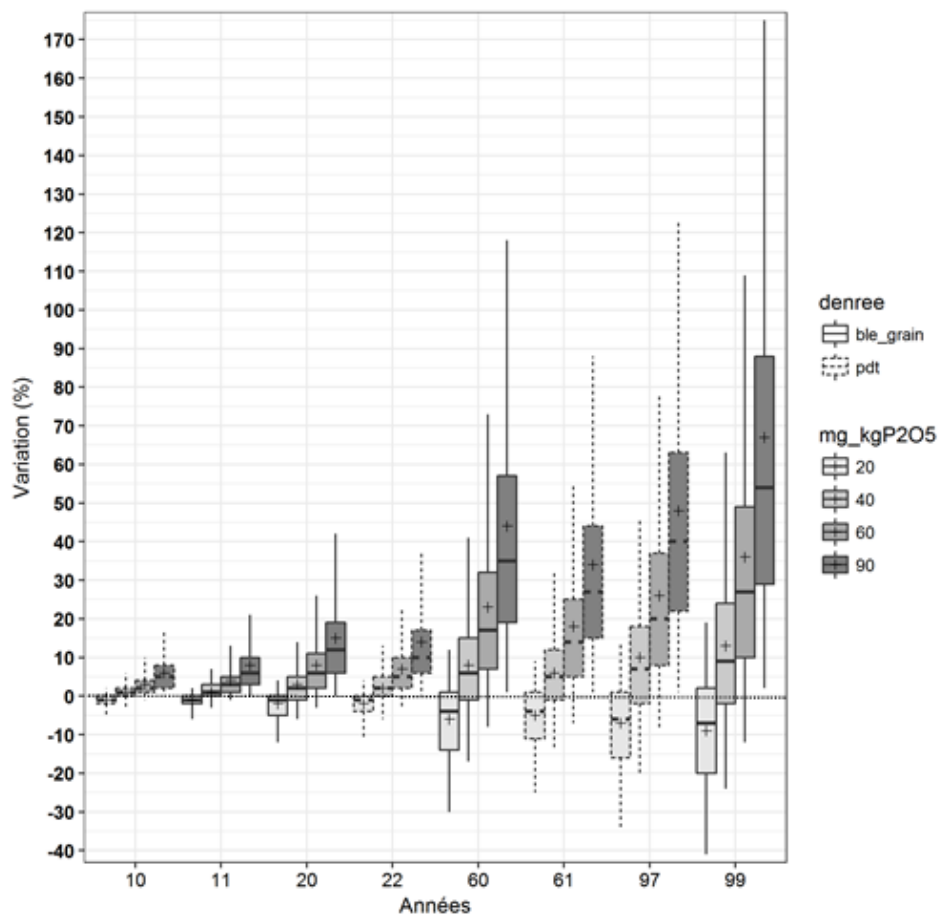


❖ Matrice culture (grain de blé, pomme de terre)

Tableau 4.3-2. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) du transfert du Cd vers le grain de blé et la pomme de terre en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation rotation pomme de terre/blé/blé 100 kg P₂O₅ .ha⁻¹an⁻¹ et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

Blé	T11ans				T20ans				T60ans				T99ans			
	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg
Moy	8	4	1	-1	15	8	3	-2	44	23	8	-6	67	36	13	-9
Min	-21	-20	-22	-58	-24	-31	-36	-67	-48	-58	-65	-78	-59	-66	-73	-84
P025	-1	-3	-5	-8	-2	-5	-9	-15	-5	-14	-23	-36	-7	-20	-33	-48
P05	0	-1	-3	-6	0	-3	-6	-12	1	-8	-17	-30	2	-12	-24	-41
P10	1	0	-2	-4	2	-1	-4	-9	7	-2	-11	-23	11	-2	-16	-34
P25	3	1	0	-2	6	2	-1	-5	19	7	-1	-14	29	10	-2	-20
P50	6	3	1	-1	12	6	2	-1	35	17	6	-4	54	27	9	-7
P75	10	5	3	0	19	11	5	0	57	32	15	1	88	49	24	2
P90	16	10	5	1	31	19	10	2	88	54	28	7	133	82	44	11
P95	21	13	7	2	42	26	14	4	118	73	41	12	175	109	63	19
P975	27	17	10	3	52	34	19	6	147	96	56	19	222	143	85	29
P99	37	24	14	5	70	46	27	10	192	130	76	29	284	193	117	45
Max	236	136	175	51	425	257	301	98	908	676	519	250	1194	904	666	352
Pomme de terre																
Pomme de terre	T10ans				T22ans				T61ans				T97ans			
	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg
Moy	6	3	1	-1	14	7	2	-2	34	18	6	-5	48	26	10	-7
Min	-18	-20	-18	-48	-24	-29	-32	-59	-41	-50	-57	-71	-50	-57	-64	-77
P025	-1	-2	-4	-6	-1	-5	-8	-14	-4	-12	-19	-31	-6	-16	-27	-41
P05	0	-1	-3	-5	0	-3	-6	-11	1	-7	-14	-25	1	-9	-20	-34
P10	1	0	-2	-4	2	-1	-3	-8	6	-1	-9	-19	9	-2	-13	-27
P25	2	1	0	-2	6	2	0	-4	15	5	-1	-11	22	8	-2	-16
P50	5	2	1	-1	10	5	2	-1	27	14	5	-4	40	20	7	-6
P75	8	4	2	0	17	10	5	0	44	25	12	1	63	37	18	1
P90	13	7	4	1	28	17	9	2	67	41	22	6	94	59	33	8
P95	17	10	6	2	37	23	13	4	88	55	32	9	123	78	46	14
P975	21	14	8	2	46	30	17	6	109	72	43	15	152	101	62	22
P99	29	19	11	4	61	40	24	9	140	96	58	23	191	134	84	33
Max	215	111	158	40	403	225	272	84	661	465	388	179	799	578	441	234

Figure 4.3-2. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) du transfert du Cd vers le grain de blé et la pomme de terre (pdt) en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation rotation pomme de terre/blé/blé 100 kg P₂O₅ .ha⁻¹.an⁻¹ et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

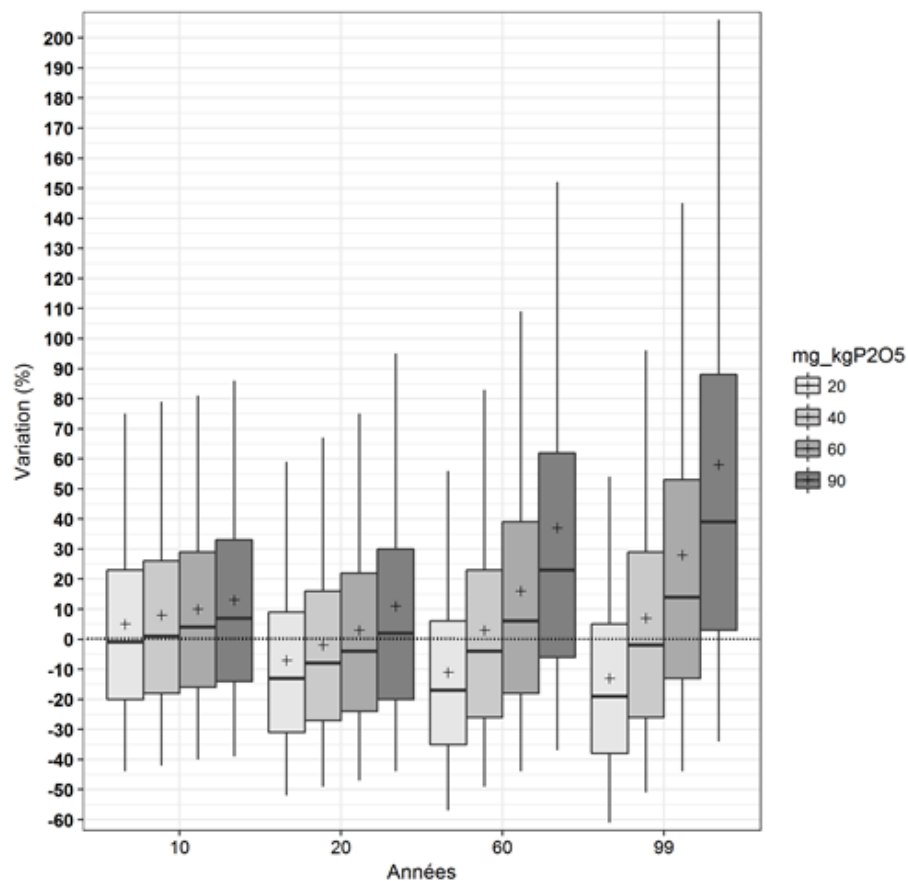


❖ Matrice lixiviat

Tableau 4.3-3. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) du transfert du Cd vers le lixiviat en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation rotation pomme de terre/blé/blé 100 kg P₂O₅ .ha⁻¹an⁻¹ et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

	T10ans				T20ans				T60ans				T99ans			
	90 mg Cd. kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd. kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd. kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd. kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg
Moy	13	10	8	5	11	3	-2	-7	37	16	3	-11	58	28	7	-13
Min	-77	-71	-76	-79	-83	-85	-78	-88	-83	-87	-81	-87	-81	-81	-86	-88
P025	-46	-47	-49	-51	-50	-54	-56	-58	-45	-51	-56	-63	-43	-51	-58	-67
P05	-39	-40	-42	-44	-44	-47	-49	-52	-37	-44	-49	-57	-34	-44	-51	-61
P10	-30	-31	-33	-35	-35	-39	-42	-45	-26	-35	-41	-49	-21	-33	-42	-53
P25	-14	-16	-18	-20	-20	-24	-27	-31	-6	-18	-26	-35	3	-13	-26	-38
P50	7	4	1	-1	2	-4	-8	-13	23	6	-4	-17	39	14	-2	-19
P75	33	29	26	23	30	22	16	9	62	39	23	6	88	53	29	5
P90	64	58	55	51	65	51	45	37	113	78	56	34	154	103	65	34
P95	86	81	79	75	95	75	67	59	152	109	83	56	206	145	96	54
P975	112	106	104	101	125	97	90	81	195	141	111	79	266	185	127	82
P99	150	141	138	134	166	135	122	111	278	189	148	111	355	242	178	118
Max	400	425	344	331	824	431	744	271	1713	472	593	618	1528	973	862	547

Figure 4.3-3. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) du transfert du Cd vers le lixiviat en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation rotation pomme de terre/blé/blé 100 kg P₂O₅ .ha⁻¹.an⁻¹ et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)



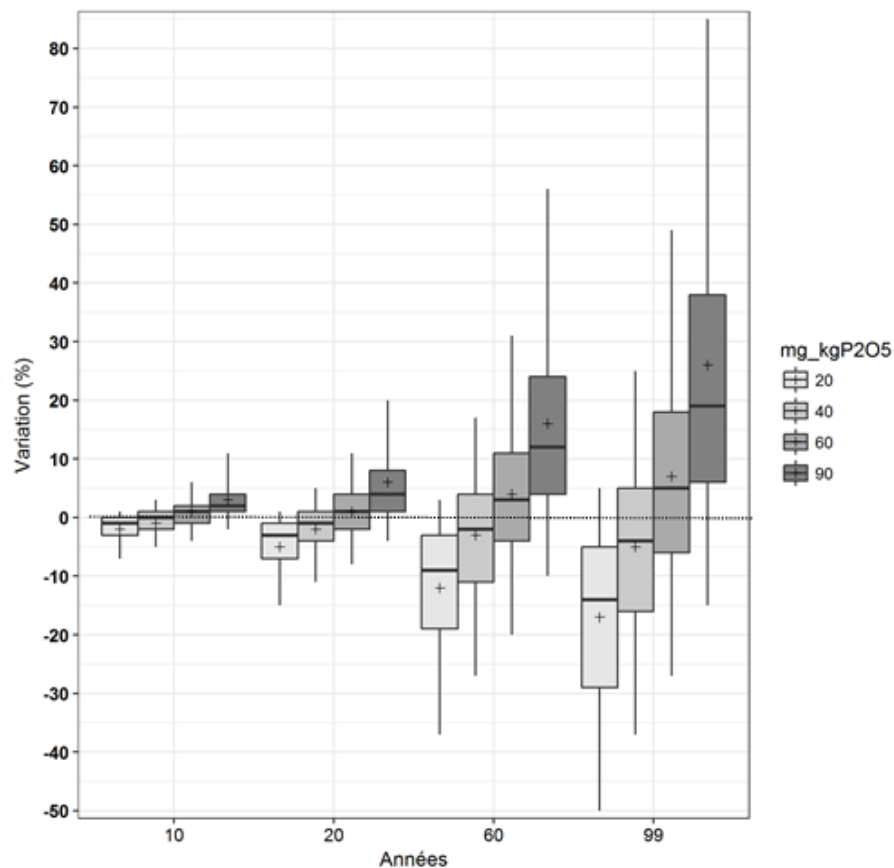
4.4 Résultats obtenus à l'issue de la modélisation liée à un itinéraire rotation pomme de terre/blé/blé avec un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans en fonction de la teneur en Cd testée dans l'intrant (scénarios 13 à 16) et du temps de projection de la simulation

❖ Matrice sol agricole

Tableau 4.4-1. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) de l'accumulation du Cd dans le sol en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation rotation pomme de terre/blé/blé 180 kg P₂O₅.ha⁻¹an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

	T10ans				T20ans				T60ans				T99ans			
	90 mg.kg P2O5	60 mg.kg P2O5	40 mg.kg P2O5	20 mg.kg P2O5	90 mg.kg P2O5	60 mg.kg P2O5	40 mg.kg P2O5	20 mg.kg P2O5	90 mg.kg P2O5	60 mg.kg P2O5	40 mg.kg P2O5	20 mg.kg P2O5	90 mg.kg P2O5	60 mg.kg P2O5	40 mg.kg P2O5	20 mg.kg P2O5
Moy	3	1	-1	-2	6	1	-2	-5	16	4	-3	-12	26	7	-5	-17
Min	-17	-26	-34	-37	-31	-44	-53	-58	-52	-72	-71	-85	-62	-78	-81	-88
P025	-3	-5	-7	-10	-7	-10	-14	-19	-17	-25	-33	-46	-23	-35	-44	-59
P05	-2	-4	-5	-7	-4	-8	-11	-15	-10	-20	-27	-37	-15	-27	-37	-50
P10	-1	-2	-4	-6	-2	-5	-8	-11	-4	-14	-20	-30	-6	-19	-29	-42
P25	1	-1	-2	-3	1	-2	-4	-7	4	-4	-11	-19	6	-6	-16	-29
P50	2	1	0	-1	4	1	-1	-3	12	3	-2	-9	19	5	-4	-14
P75	4	2	1	0	8	4	1	-1	24	11	4	-3	38	18	5	-5
P90	7	4	2	0	14	7	3	0	41	22	11	0	63	34	16	1
P95	11	6	3	1	20	11	5	1	56	31	17	3	85	49	25	5
P975	14	8	4	1	26	15	8	2	72	42	26	7	111	65	39	11
P99	19	11	7	2	37	21	13	5	99	59	39	14	149	92	57	22
Max	130	87	75	49	233	161	141	85	511	375	341	181	632	498	377	214

Figure 4.4-1. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) de l'accumulation du Cd dans le sol en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation rotation pomme de terre/blé/blé 180 kg P₂O₅ .ha⁻¹.an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

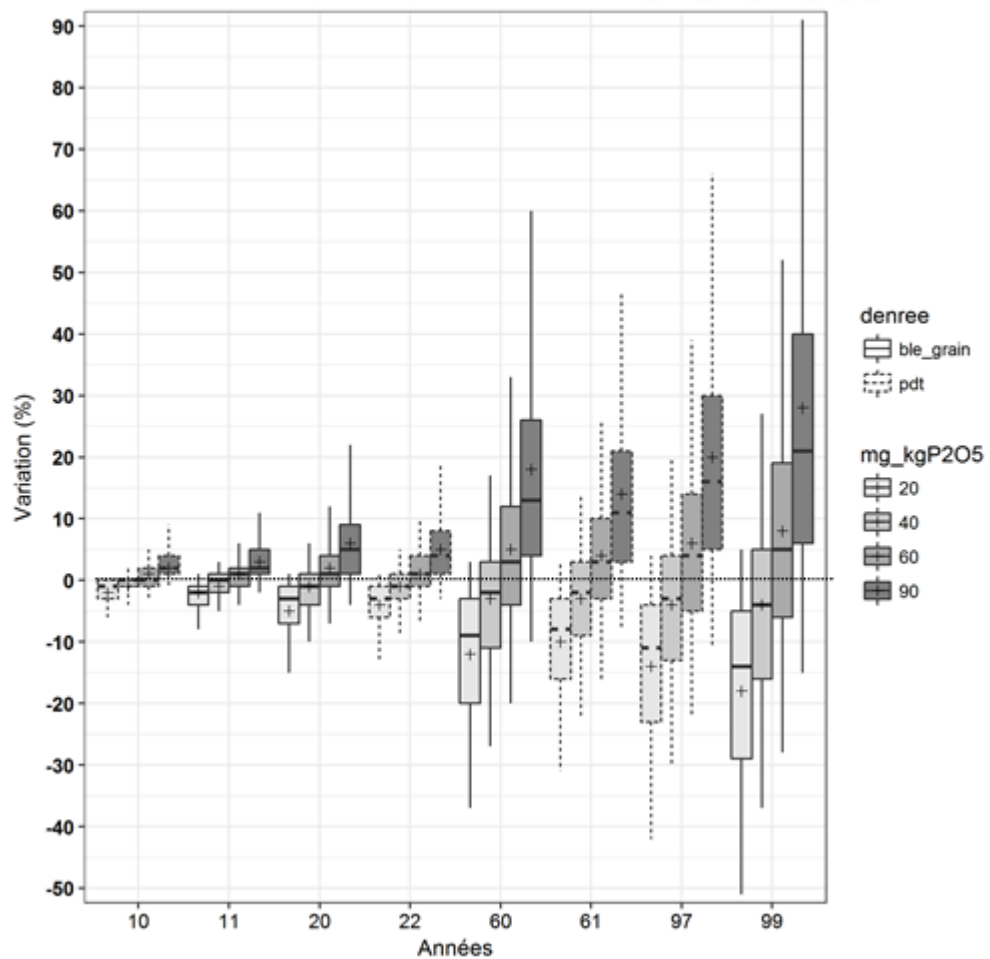


❖ Matrice culture (grain de blé et pomme de terre)

Tableau 4.4-2. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) du transfert du Cd vers le grain de blé et la pomme de terre en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation rotation pomme de terre/blé/blé 180 kg P₂O₅ .ha⁻¹an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

Blé																
	T11ans				T20ans				T60ans				T99ans			
	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg
Moy	3	1	-1	-2	6	2	-1	-5	18	5	-3	-12	28	8	-4	-18
Min	-16	-27	-34	-38	-29	-43	-48	-57	-51	-72	-74	-85	-62	-79	-81	-88
P025	-3	-5	-7	-10	-6	-10	-13	-19	-17	-25	-33	-46	-24	-35	-45	-60
P05	-2	-4	-5	-8	-4	-7	-10	-15	-10	-20	-27	-37	-15	-28	-37	-51
P10	-1	-3	-4	-6	-1	-5	-7	-11	-4	-14	-20	-30	-6	-20	-29	-42
P25	1	-1	-2	-4	1	-1	-4	-7	4	-4	-11	-20	6	-6	-16	-29
P50	2	1	0	-2	5	1	-1	-3	13	3	-2	-9	21	5	-4	-14
P75	5	2	1	-1	9	4	1	-1	26	12	3	-3	40	19	5	-5
P90	8	4	2	0	15	8	4	0	44	23	11	0	67	36	17	1
P95	11	6	3	1	22	12	6	1	60	33	17	3	91	52	27	5
P975	15	8	5	1	28	16	9	2	77	45	26	7	118	68	41	12
P99	20	11	7	2	39	22	14	5	105	62	39	15	159	97	60	23
Max	139	91	77	49	255	172	151	89	568	408	348	193	702	545	409	228
Pomme de terre																
	T10ans				T22ans				T61ans				T97ans			
	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd.kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg
Moy	2	1	-1	-2	5	1	-1	-4	14	4	-3	-10	20	6	-4	-14
Min	-14	-21	-29	-31	-27	-40	-45	-53	-42	-62	-64	-77	-53	-70	-73	-80
P025	-2	-4	-6	-8	-5	-9	-12	-18	-13	-21	-28	-39	-18	-28	-37	-50
P05	-1	-3	-4	-6	-3	-7	-9	-13	-8	-16	-22	-31	-11	-22	-30	-42
P10	-1	-2	-3	-5	-1	-4	-7	-10	-3	-11	-17	-25	-4	-15	-23	-35
P25	1	-1	-1	-3	1	-1	-3	-6	3	-3	-9	-16	5	-5	-13	-23
P50	2	0	0	-1	4	1	-1	-3	11	3	-2	-8	16	4	-3	-11
P75	4	2	0	0	8	4	1	-1	21	10	3	-3	30	14	4	-4
P90	6	3	1	0	14	7	3	0	34	19	9	0	50	28	13	1
P95	9	5	2	0	19	10	5	1	47	26	14	3	66	39	20	4
P975	11	6	4	1	25	14	8	2	58	35	21	6	84	50	31	9
P99	15	9	5	2	34	19	12	4	78	48	31	12	111	70	45	18
Max	96	66	57	38	187	133	119	74	352	267	233	139	412	335	266	159

Figure 4.4-2. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) du transfert du Cd vers le grain de blé et la pomme de terre (pdt) en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation rotation pomme de terre/blé/blé 180 kg P₂O₅ .ha⁻¹an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

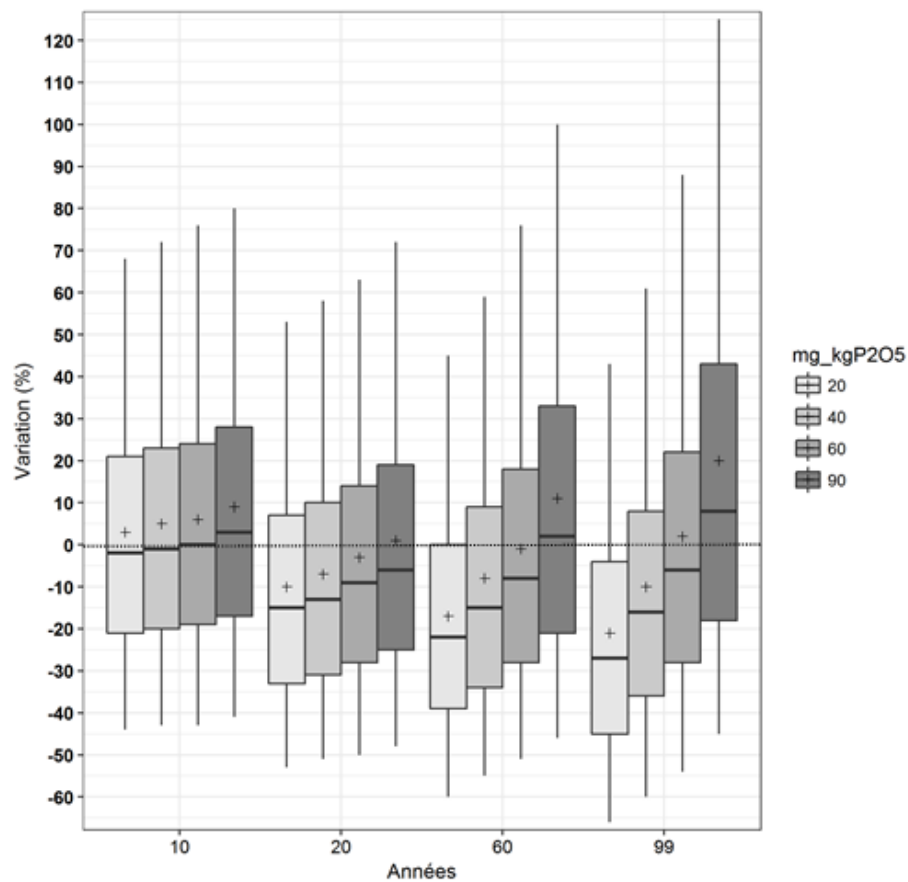


❖ Matrice lixivié

Tableau 4.4-3. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) du transfert du Cd vers le lixivié en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation rotation pomme de terre/blé/blé 180 kg P₂O₅ .ha⁻¹an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)

	T10ans				T20ans				T60ans				T99ans			
	90 mg Cd. kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd. kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd. kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg	90 mg Cd. kg	60 mg Cd.kg	40 mg Cd.kg	20 mg Cd.kg
Moy	9	6	5	3	1	-3	-7	-10	11	-1	-8	-17	20	2	-10	-21
Min	-80	-74	-77	-74	-82	-80	-81	-84	-80	-86	-84	-92	-82	-86	-89	-90
P025	-48	-50	-49	-50	-55	-57	-57	-59	-53	-57	-62	-66	-53	-60	-65	-72
P05	-41	-43	-43	-44	-48	-50	-51	-53	-46	-51	-55	-60	-45	-54	-60	-66
P10	-32	-34	-35	-36	-40	-42	-44	-47	-37	-43	-48	-53	-35	-45	-52	-59
P25	-17	-19	-20	-21	-25	-28	-31	-33	-21	-28	-34	-39	-18	-28	-36	-45
P50	3	0	-1	-2	-6	-9	-13	-15	2	-8	-15	-22	8	-6	-16	-27
P75	28	24	23	21	19	14	10	7	33	18	9	0	43	22	8	-4
P90	57	53	51	49	50	42	39	33	70	51	38	25	90	58	39	22
P95	80	76	72	68	72	63	58	53	100	76	59	45	125	88	61	43
P975	104	100	96	87	96	88	79	74	132	104	82	64	158	117	85	63
P99	143	133	128	115	132	120	115	101	176	141	113	92	213	162	122	96
Max	395	326	276	340	520	238	327	268	509	496	426	309	1126	650	407	249

Figure 4.4-3. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) du transfert du Cd vers le lixiviat en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction de l'itinéraire de fertilisation rotation pomme de terre/blé/blé 180 kg P₂O₅ .ha⁻¹.an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans et des teneurs en Cd constantes au cours de la simulation testées dans l'engrais phosphaté (90, 60, 40, 20 mg. Cd kgP₂O₅⁻¹)



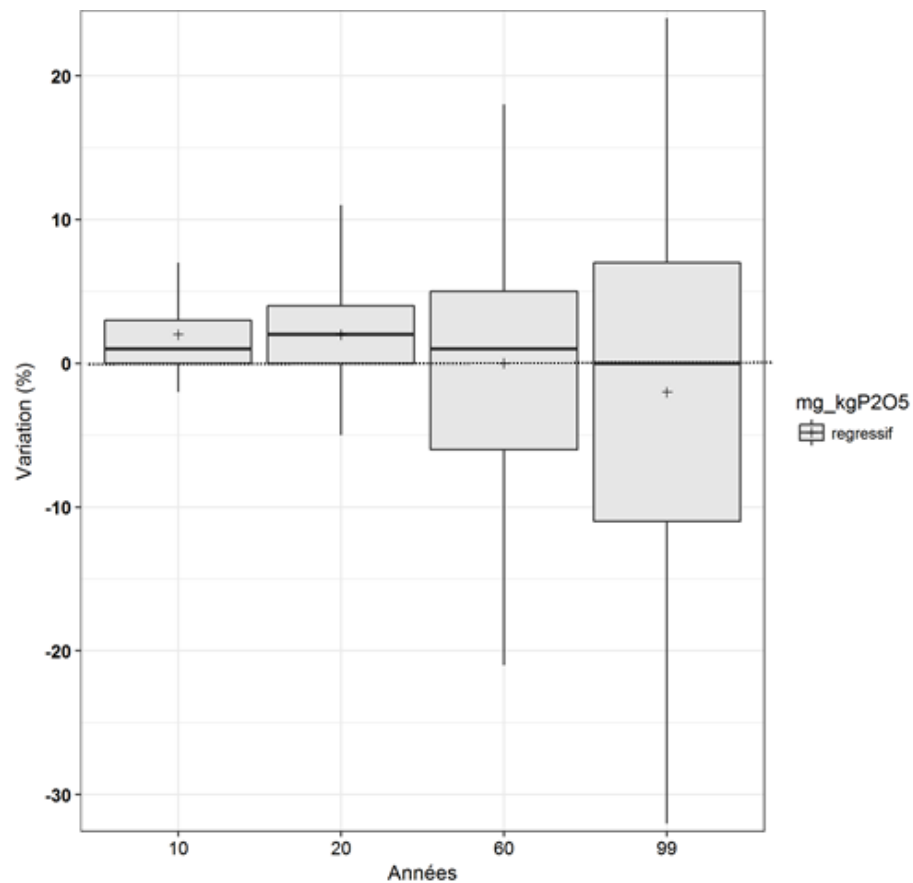
4.5 Résultats obtenus à l'issue de la modélisation liée à un itinéraire monoculture blé avec un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ en fonction de concentrations en Cd dégressives (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ (en accord avec le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE) testées dans l'intrant (scénario 17) et du temps de projection de la simulation

❖ Matrice sol agricole

Tableau 4.5-1. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	T10ans	T20ans	T60ans	T99ans
Moy	2	2	0	-2
Min	-21	-40	-71	-80
P025	-3	-8	-28	-40
P05	-2	-5	-21	-32
P10	-1	-3	-14	-23
P25	0	0	-6	-11
P50	1	2	1	0
P75	3	4	5	7
P90	5	8	12	16
P95	7	11	18	24
P975	10	15	25	35
P99	13	20	35	50
Max	96	159	268	329

Figure 4.5-1. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant ($60 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ sur les trois premières années d'apport → $40 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ pendant 12 ans → $20 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$)

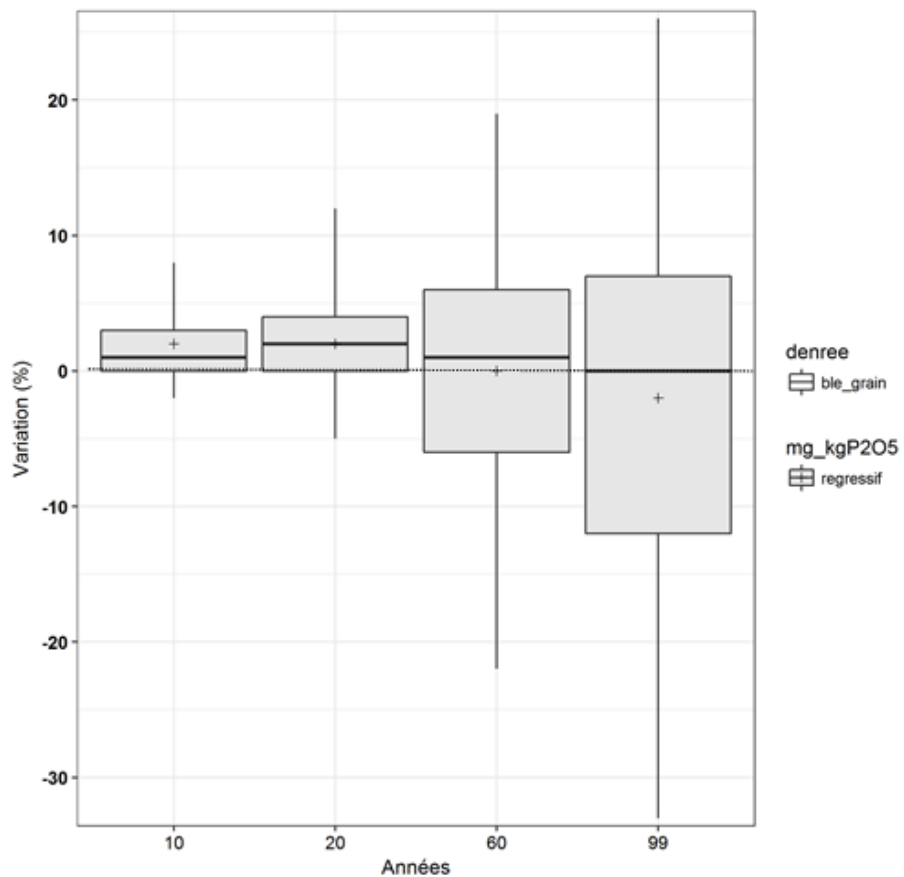


❖ Matrice culture (grain de blé)

Tableau 4.5-2. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice culture (grain de blé) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	T10ans	T20ans	T60ans	T99ans
Moy	2	2	0	-2
Min	-22	-41	-73	-81
P025	-3	-8	-29	-41
P05	-2	-5	-22	-33
P10	-1	-3	-15	-24
P25	0	0	-6	-12
P50	1	2	1	0
P75	3	4	6	7
P90	5	8	12	17
P95	8	12	19	26
P975	10	16	26	37
P99	13	21	37	52
Max	101	169	287	355

Figure 4.5-2. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice culture (grain de blé) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

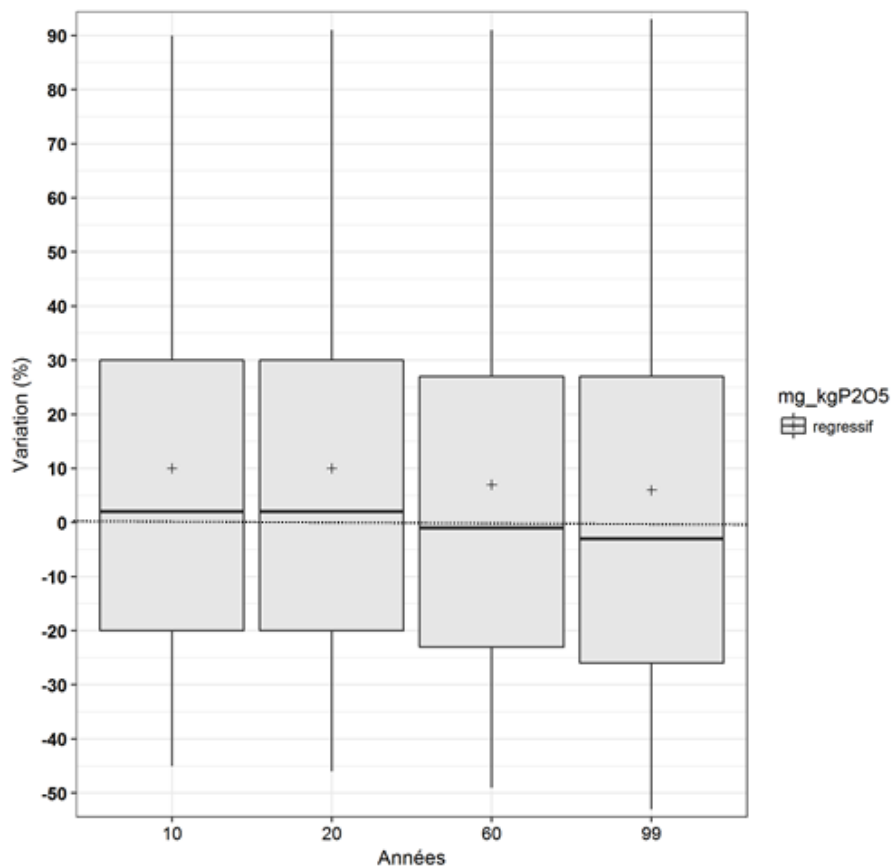


❖ Matrice lixiviat

Tableau 4.5-3. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice lixiviat le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 80 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	T10ans	T20ans	T60ans	T99ans
Moy	10	10	7	6
Min	-79	-85	-90	-90
P025	-52	-53	-56	-61
P05	-45	-46	-49	-53
P10	-36	-37	-40	-43
P25	-20	-20	-23	-26
P50	2	2	-1	-3
P75	30	30	27	27
P90	64	63	63	63
P95	90	91	91	93
P975	120	119	122	123
P99	155	158	169	171
Max	479	425	371	679

Figure 4.5-3. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice lixiviée le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de $80 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant ($60 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ sur les trois premières années d'apport → $40 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ pendant 12 ans → $20 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$)



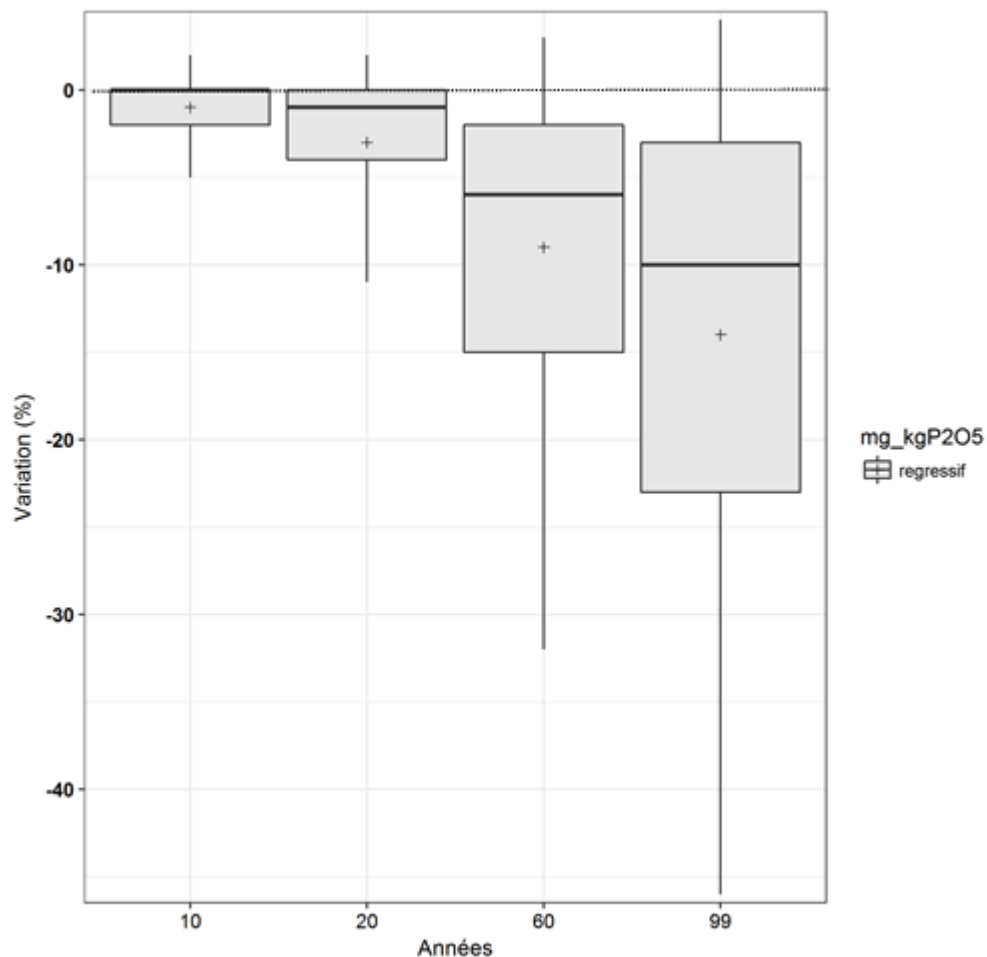
4.6 Résultats obtenus à l'issue de la modélisation liée à un itinéraire monoculture blé avec un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans en fonction de concentrations en Cd dégressives (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ (en accord avec le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE) testées dans l'intrant (scénario 18) et du temps de projection de la simulation

❖ Matrice sol agricole

Tableau 4.6-1. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	T10ans	T20ans	T60ans	T99ans
Moy	-1	-3	-9	-14
Min	-31	-56	-88	-90
P025	-7	-14	-39	-54
P05	-5	-11	-32	-46
P10	-4	-8	-25	-37
P25	-2	-4	-15	-23
P50	0	-1	-6	-10
P75	0	0	-2	-3
P90	1	1	1	1
P95	2	2	3	4
P975	2	3	6	8
P99	4	5	10	16
Max	29	46	81	113

Figure 4.6-1. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec un temps d'impassé de 2 ans ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

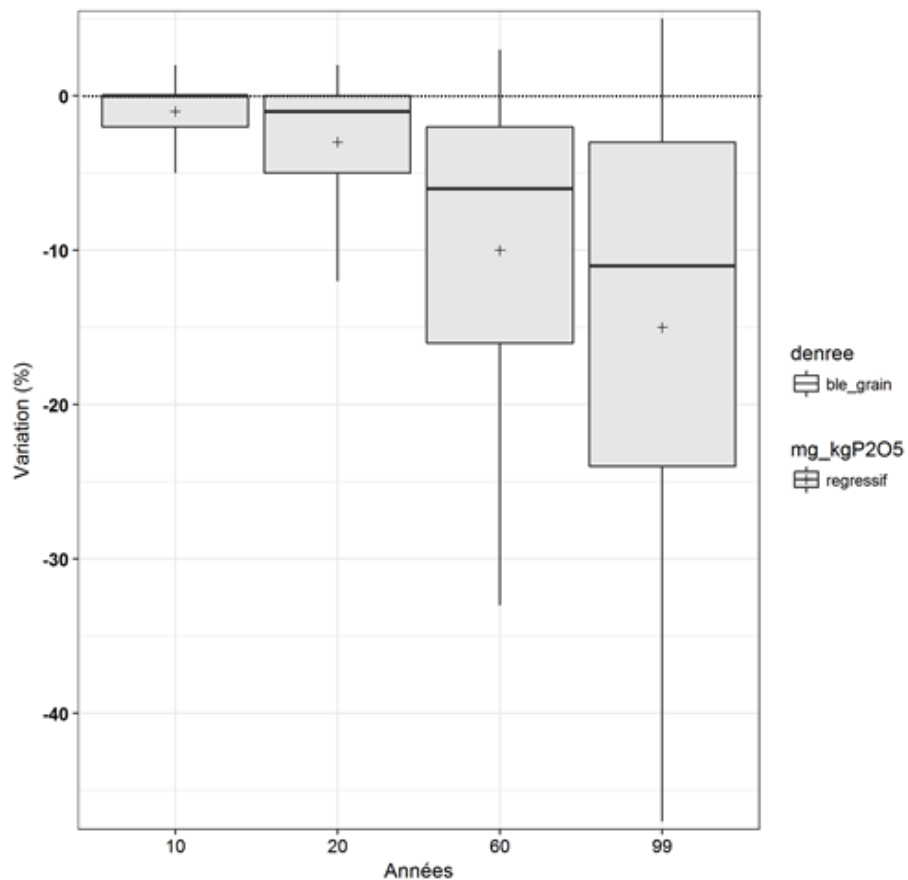


❖ Matrice culture (grain de blé)

Tableau 4.6-2. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice culture (grain de blé) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	T10ans	T20ans	T60ans	T99ans
Moy	-1	-3	-10	-15
Min	-32	-57	-89	-91
P025	-7	-15	-41	-55
P05	-5	-12	-33	-47
P10	-4	-9	-26	-38
P25	-2	-5	-16	-24
P50	0	-1	-6	-11
P75	0	0	-2	-3
P90	1	1	1	1
P95	2	2	3	5
P975	2	3	6	9
P99	4	6	11	17
Max	30	48	85	119

Figure 4.6-2. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice culture (grain de blé) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

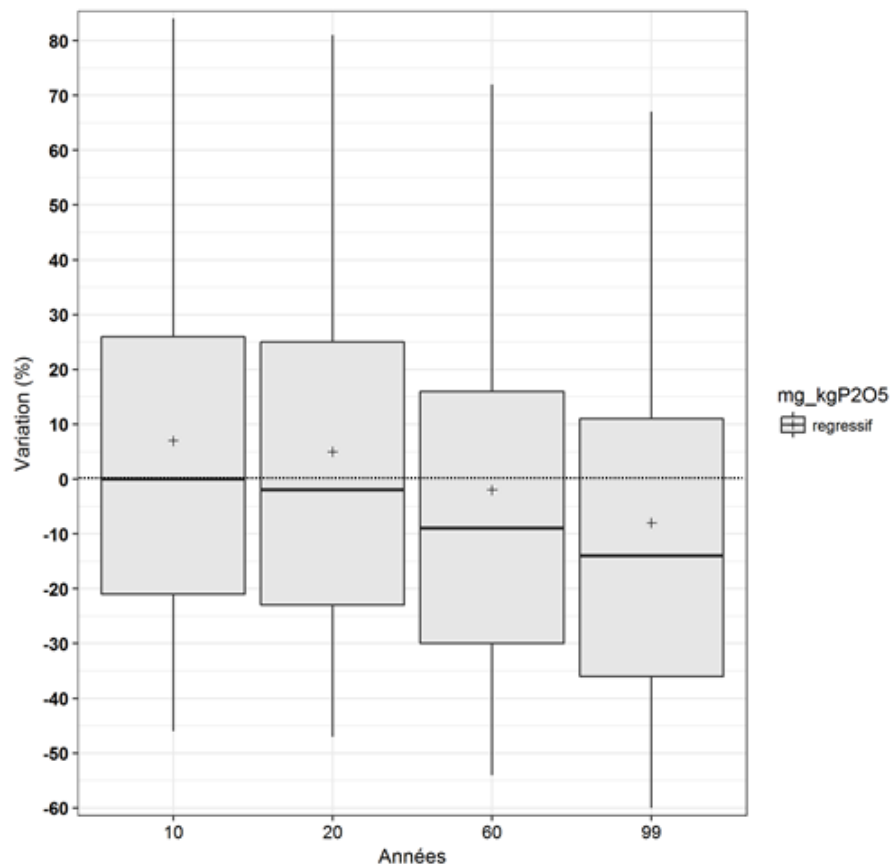


❖ Matrice lixiviat

Tableau 4.6-3. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice lixiviat le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	T10ans	T20ans	T60ans	T99ans
Moy	7	5	-2	-8
Min	-82	-82	-90	-92
P025	-53	-54	-61	-67
P05	-46	-47	-54	-60
P10	-37	-39	-46	-52
P25	-21	-23	-30	-36
P50	0	-2	-9	-14
P75	26	25	16	11
P90	59	56	47	43
P95	84	81	72	67
P975	111	109	101	95
P99	144	145	139	132
Max	421	323	466	330

Figure 4.6-3. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice lixiviée le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)



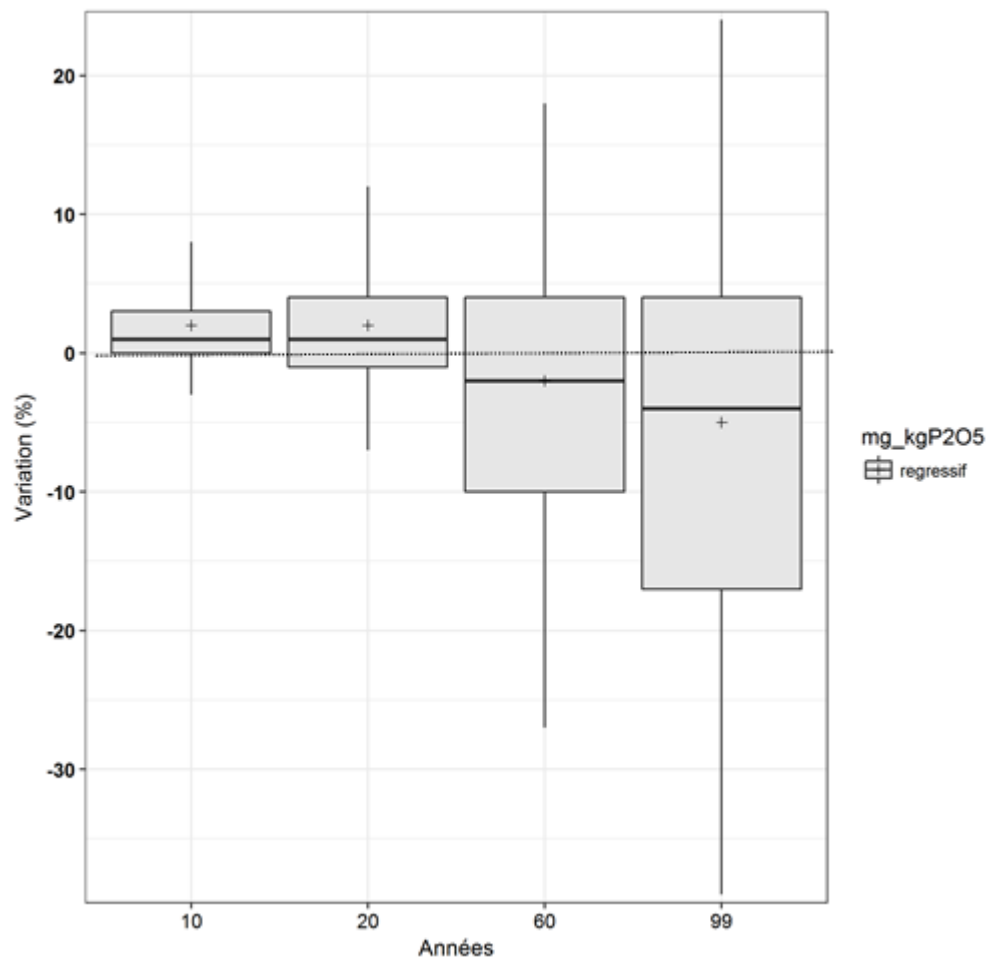
4.7 Résultats obtenus à l'issue de la modélisation liée à un itinéraire monoculture rotation pomme de terre-blé-blé avec un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ en fonction de concentrations en Cd dégressives (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ (en accord avec le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE) testées dans l'intrant (scénario 19) et du temps de projection de la simulation

❖ Matrice sol agricole

Tableau 4.7-1. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	T10ans	T20ans	T60ans	T99ans
Moy	2	2	-2	-5
Min	-32	-51	-77	-83
P025	-4	-10	-34	-47
P05	-3	-7	-27	-39
P10	-1	-4	-19	-30
P25	0	-1	-10	-17
P50	1	1	-2	-4
P75	3	4	4	4
P90	6	9	12	15
P95	8	12	18	24
P975	11	17	26	34
P99	16	24	39	53
Max	225	313	394	508

Figure 4.7-1. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant ($60 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ sur les trois premières années d'apport → $40 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ pendant 12 ans → $20 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$)

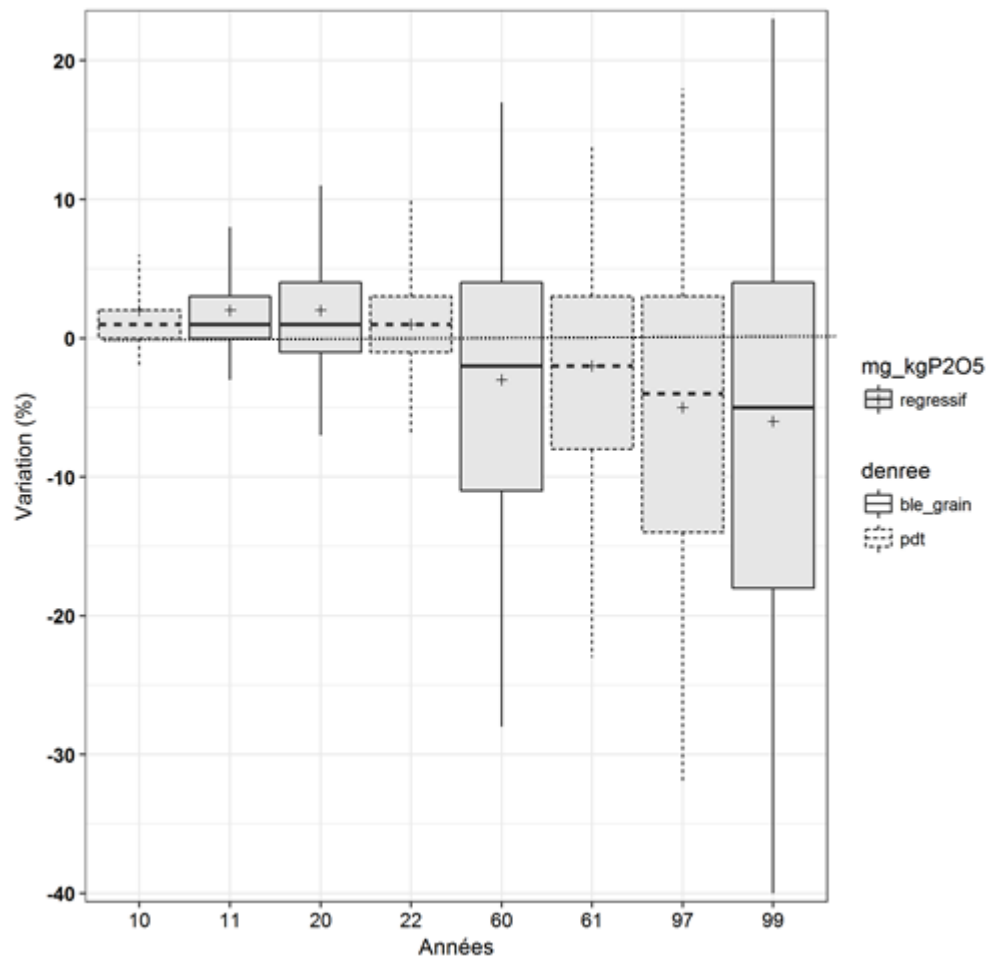


❖ Matrice culture (grain de blé, pomme de terre)

Tableau 4.7-2. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice culture (grain de blé, pomme de terre (pdt)) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

Blé	T11ans	T20ans	T60ans	T99ans
Moy	2	2	-3	-6
Min	-30	-50	-78	-84
P025	-5	-11	-36	-49
P05	-3	-7	-28	-40
P10	-2	-5	-20	-31
P25	0	-1	-11	-18
P50	1	1	-2	-5
P75	3	4	4	4
P90	5	8	11	14
P95	8	11	17	23
P975	10	15	25	34
P99	15	22	38	52
Max	152	204	339	445
Pdt	T10ans	T22ans	T61ans	T97ans
Moy	2	1	-2	-5
Min	-27	-47	-70	-76
P025	-3	-10	-30	-40
P05	-2	-7	-23	-32
P10	-1	-4	-16	-25
P25	0	-1	-8	-14
P50	1	1	-2	-4
P75	2	3	3	3
P90	5	7	9	12
P95	6	10	14	18
P975	9	14	21	26
P99	13	20	31	40
Max	160	213	266	328

Figure 4.7-2. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice culture (grain de blé, pomme de terre (pdt)) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de $100 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant ($60 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ sur les trois premières années d'apport → $40 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ pendant 12 ans → $20 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$)

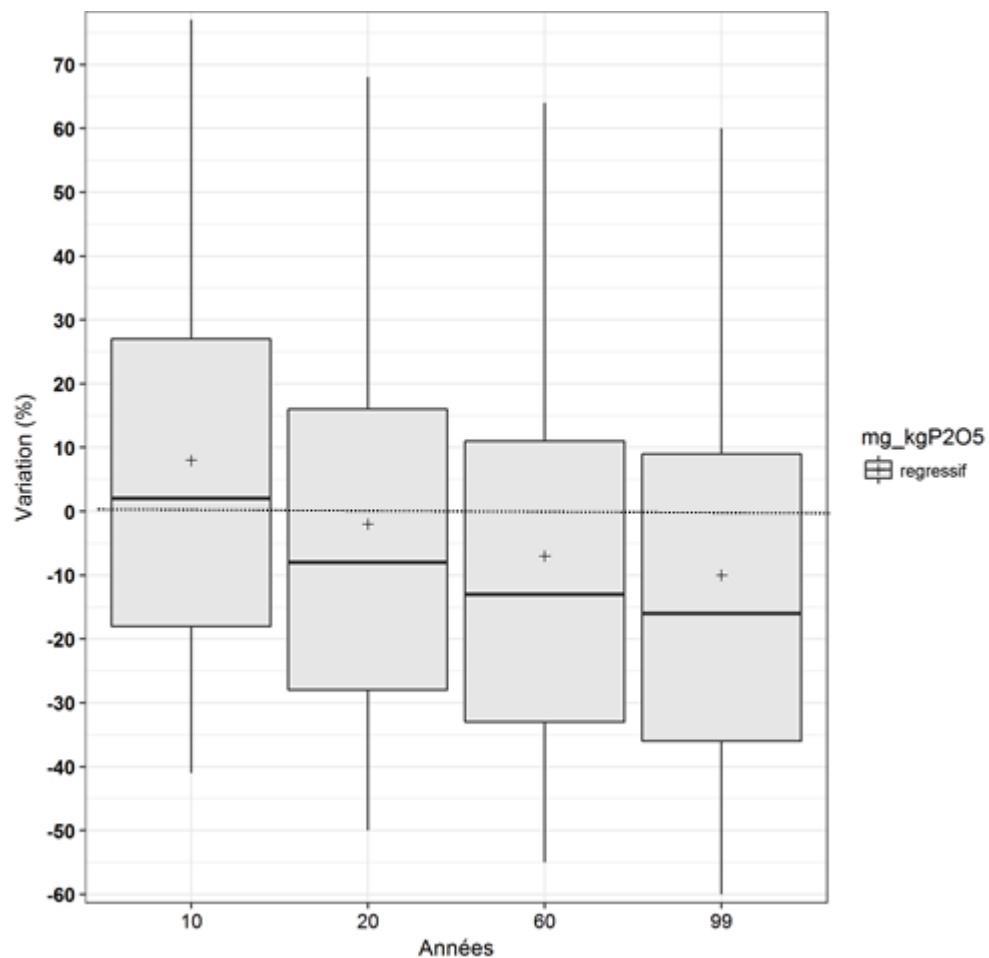


❖ Matrice lixiviat

Tableau 4.7-3. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice lixiviat le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	T10ans	T20ans	T60ans	T99ans
Moy	8	-2	-7	-10
Min	-79	-81	-86	-90
P025	-48	-57	-62	-66
P05	-41	-50	-55	-60
P10	-33	-41	-47	-51
P25	-18	-28	-33	-36
P50	2	-8	-13	-16
P75	27	16	11	9
P90	56	45	41	38
P95	77	68	64	60
P975	101	92	89	86
P99	137	128	121	125
Max	434	377	432	669

Figure 4.7-3. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice lixiviée le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 100 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)



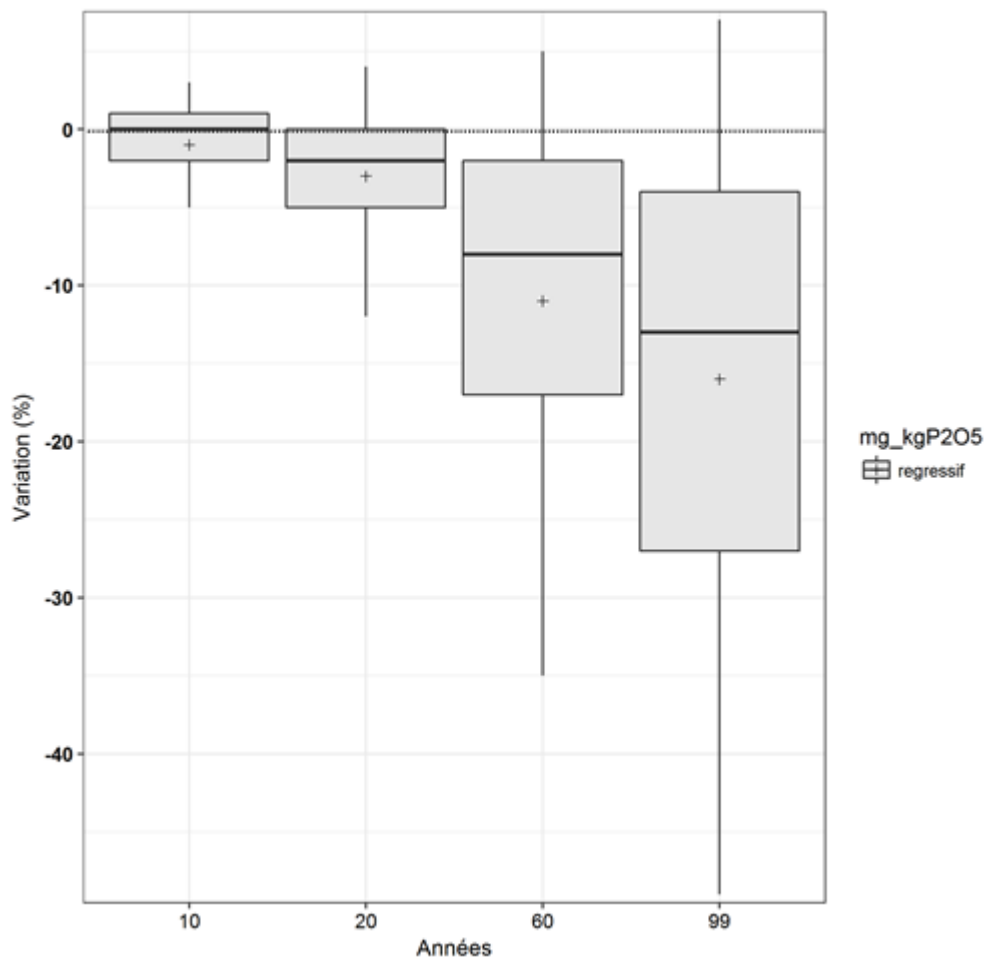
4.8 Résultats obtenus à l'issue de la modélisation liée à un itinéraire monoculture rotation pomme de terre-blé-blé avec un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ et un temps d'impasse de 2 ans en fonction de concentrations en Cd dégressives (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ (en accord avec le projet de révision de la réglementation des fertilisants labélisés CE) testées dans l'intrant (scénario 20) et du temps de projection de la simulation

❖ Matrice sol agricole

Tableau 4.8-1. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	T10ans	T20ans	T60ans	T99ans
Moy	-1	-3	-11	-16
Min	-34	-58	-82	-87
P025	-7	-15	-42	-56
P05	-5	-12	-35	-49
P10	-4	-9	-27	-40
P25	-2	-5	-17	-27
P50	0	-2	-8	-13
P75	1	0	-2	-4
P90	2	2	2	2
P95	3	4	5	7
P975	4	6	9	13
P99	6	9	16	23
Max	44	67	117	155

Figure 4.8-1. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice sol le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

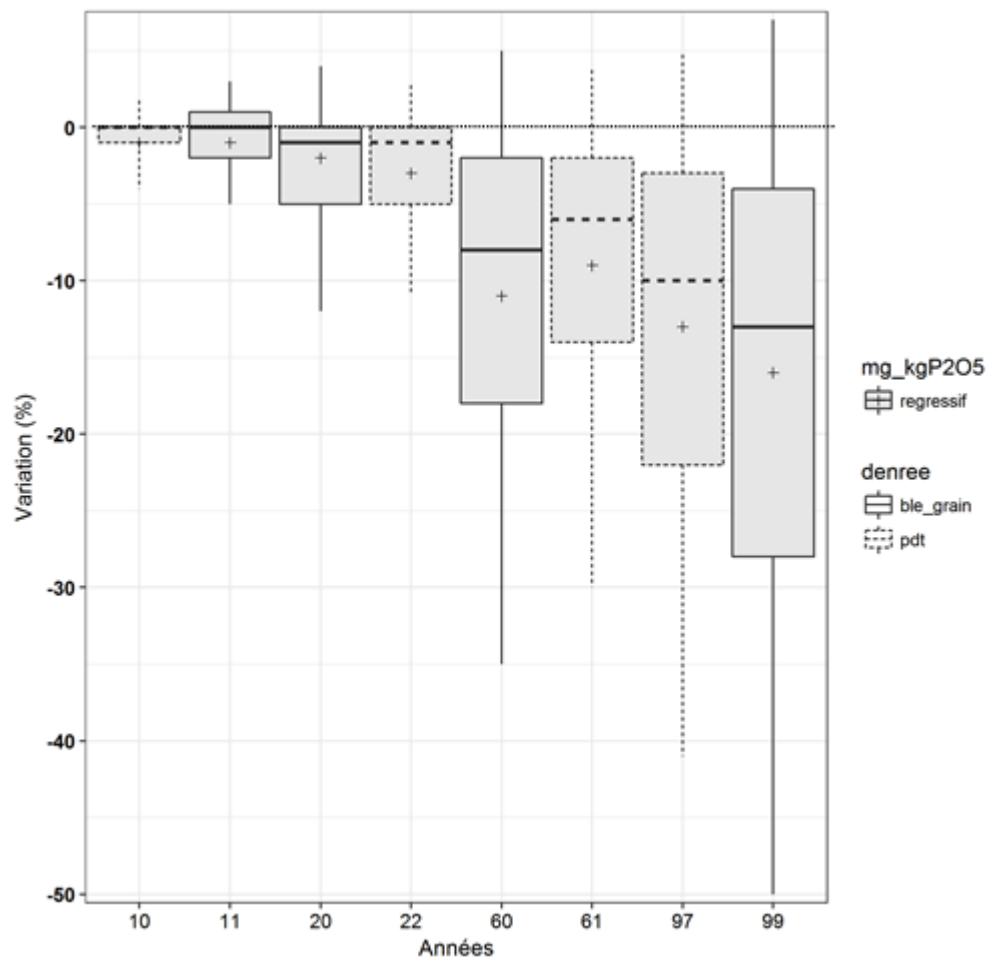


❖ Matrice culture (grain de blé, pomme de terre)

Tableau 4.8-2. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice culture (grain de blé, pomme de terre (pdt)) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

Blé	T11ans	T20ans	T60ans	T99ans
Moy	-1	-2	-11	-16
Min	-36	-58	-82	-88
P025	-7	-15	-43	-57
P05	-5	-12	-35	-50
P10	-4	-9	-28	-41
P25	-2	-5	-18	-28
P50	0	-1	-8	-13
P75	1	0	-2	-4
P90	2	2	2	2
P95	3	4	5	7
P975	4	6	10	13
P99	6	10	17	24
Max	46	70	124	165
Pdt	T10ans	T22ans	T61ans	T97ans
Moy	-1	-3	-9	-13
Min	-28	-53	-74	-80
P025	-6	-14	-36	-48
P05	-4	-11	-30	-41
P10	-3	-8	-23	-33
P25	-1	-5	-14	-22
P50	0	-1	-6	-10
P75	0	0	-2	-3
P90	1	2	2	2
P95	2	3	4	5
P975	3	5	8	10
P99	5	8	14	19
Max	35	56	91	115

Figure 4.8-2. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice culture (grain de blé, pomme de terre (pdt)) le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de $180 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$ avec un temps d'impasse de 2 ans ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant ($60 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ sur les trois premières années d'apport → $40 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ pendant 12 ans → $20 \text{ mg Cd} \cdot \text{kg P}_2\text{O}_5^{-1}$)

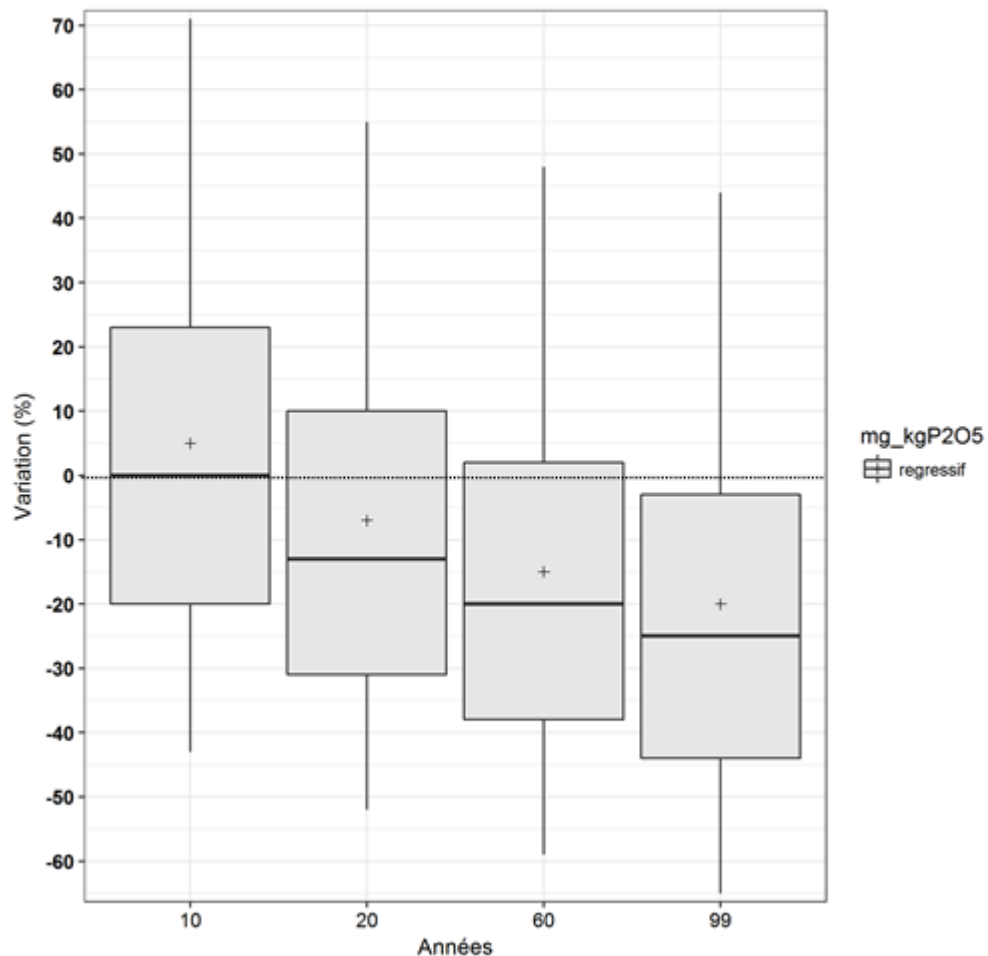


❖ Matrice lixiviati

Tableau 4.8-3. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice lixiviati le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)

	T10ans	T20ans	T60ans	T99ans
Moy	5	-7	-15	-20
Min	-79	-82	-89	-92
P025	-50	-58	-66	-71
P05	-43	-52	-59	-65
P10	-35	-44	-52	-58
P25	-20	-31	-38	-44
P50	0	-13	-20	-25
P75	23	10	2	-3
P90	51	36	28	23
P95	71	55	48	44
P975	94	75	68	68
P99	124	107	101	105
Max	318	259	289	452

Figure 4.8-3. Boxplot représentant l'étude du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans la matrice lixiviée le long de la simulation de 1 à 99 ans pour le scénario lié à un apport d'engrais phosphaté de 180 kg P₂O₅. ha⁻¹ an⁻¹ avec un temps d'impasse de 2 ans ainsi que de concentrations en Cd dégressives en Cd dans l'intrant (60 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ sur les trois premières années d'apport → 40 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹ pendant 12 ans → 20 mg Cd. kg P₂O₅⁻¹)



Annexe 5 : Tables des pourcentages de variation moyens du niveau de contamination en Cd de la culture par rapport à la première année de référence obtenus au cours de la simulation pour le blé (grain) et la pomme de terre en fonction de chaque scénario testé et au regard de la modélisation sur le risque sanitaire pour le consommateur

Scenario		Diff_blé_T10 ans	Diff_blé_T20 ans	Diff_blé_T60 ans	Diff_blé_T99 ans
Monoculture blé					
Blé/blé/blé, 80/80/80 kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹ , [Cd] 90 mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹ ₁	1	+7%	+15%	+42%	+64%
Blé/blé/blé, 80/80/80 kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹ , [Cd] 60 mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹ ₁	2	+4%	+8%	+22%	+34%
Blé/blé/blé, 80/80/80 kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹ , [Cd] 40 mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹ ₁	3	+2%	+3%	+10%	+15%

Scenario		Diff_blé_T10 ans	Diff_blé_T20 ans	Diff_blé_T60 ans	Diff_blé_T99 ans
Blé/blé/blé, 80/80/80 kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹ , [Cd] 20 mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹ ₁	4	-1%	-1%	-3%	-4%
Blé/blé/blé, 100/0/0 kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹ , [Cd] 90 mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹ ₁	5	+1%	+2%	+7%	+11%
Blé/blé/blé, 100/0/0 kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹ , [Cd] 60 mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹ ₁	6	0	-1%	-1%	0
Blé/blé/blé, 100/0/0 kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹ , [Cd] 40 mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹ ₁	7	-1%	-2%	-6%	-8%
Blé/blé/blé, 100/0/0 kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹ , [Cd] 20 mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹ ₁	8	-2%	-4%	-11%	-16%

Scenario		Diff_pdt_ T10ans	Diff_pdt_ T22ans	Diff_pdt_ T61ans	Diff_pdt_ T97ans	Diff_blé_ T11ans	Diff_blé_ T20ans	Diff_blé_ T60ans	Diff_blé_ T99ans
Rotation pommes de terre/blé/blé									
Pomme de terre/blé/blé 100/100/10 0 kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹ , [Cd] 90 mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹	9	+6%	+14%	+34%	+48%	+8%	+15%	+44%	+67%
Pomme de terre/blé/blé 100/100/10 0 kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹ , [Cd] 60 mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹	10	+3%	+7%	+18%	+26%	+4%	+8%	+23%	+36%
Pomme de terre/blé/blé 100/100/10 0 kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹ , [Cd] 40 mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹	11	+1%	+2%	+6%	+10%	+1%	+3%	+8%	+13%

Scenario		Diff_pdt_ T10ans	Diff_pdt_ T22ans	Diff_pdt_ T61ans	Diff_pdt_ T97ans	Diff_blé_ T11ans	Diff_blé_ T20ans	Diff_blé_ T60ans	Diff_blé_ T99ans
Pomme de terre/blé/blé 100/100/10 0 kg $P_2O_5 \cdot ha^{-1}$ an^{-1} , [Cd] 20 mg $Cd \cdot kg P_2O_5^{-1}$	12	-1%	-2%	-5%	-7%	-1%	-2%	-6%	-9%
Pomme de terre/blé/blé 180/0/0 kg $P_2O_5 \cdot ha^{-1}$ an^{-1} , [Cd] 90 mg $Cd \cdot kg P_2O_5^{-1}$	13	+2%	+5%	+14%	+20%	+3%	+6%	+18%	+28%
Pomme de terre/blé/blé 180/0/0 kg $P_2O_5 \cdot ha^{-1}$ an^{-1} , [Cd] 60 mg $Cd \cdot kg P_2O_5^{-1}$	14	+1%	+1%	+4%	+6%	+1%	+2%	+5%	+8%

Scenario		Diff_pdt_ T10ans	Diff_pdt_ T22ans	Diff_pdt_ T61ans	Diff_pdt_ T97ans	Diff_blé_ T11ans	Diff_blé_ T20ans	Diff_blé_ T60ans	Diff_blé_ T99ans
Pomme de terre/blé/blé 180/0/0 kg $P_2O_5 \cdot ha^{-1}$ an^{-1} , [Cd] 40 mg $Cd \cdot kg P_2O_5^{-1}$	15	-1%	-1%	-3%	-4%	-1%	-1%	-3%	-4%
Pomme de terre/blé/blé , 180/0/0 kg $P_2O_5 \cdot ha^{-1}$ an^{-1} , [Cd] 20 mg $Cd \cdot kg P_2O_5^{-1}$	16	-2%	-4%	-10%	-14%	-2%	-5%	-12%	-18%

Scenario		Diff_blé_T10ans	Diff_blé_T20ans	Diff_blé_T60ans	Diff_blé_T99ans
Monoculture blé					
Blé/blé/blé, 80/80/80 kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹ , [Cd] 60 (3 ans) -> 40 (12 ans) -> 20 mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹	17	+2%	+2%	0%	-2%
Blé/blé/blé, 100/0/0 kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹ , [Cd] 60 (3 ans) -> 40 (12 ans) -> 20 mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹	18	-1%	-3%	-10%	-15%

Scenario		Diff_pdt_ T10ans	Diff_pdt_ T22ans	Diff_pdt_ T61ans	Diff_pdt_ T97ans	Diff_ble_ T11ans	Diff_ble_ T20ans	Diff_ble_ T60ans	Diff_ble_ T99ans
Rotation pommes de terre/blé/blé									
Pomme de terre/blé/blé 100/100/10 0 kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹ , [Cd] 60 (3 ans) -> 40 (12 ans) -> 20 mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹	19	+2%	+1%	-2%	-5%	+2%	+2%	-3%	-6%
Pomme de terre/blé/blé 180/0/0 kg P ₂ O ₅ .ha ⁻¹ an ⁻¹ , [Cd] 60 (3 ans) -> 40 (12 ans) -> 20 mg Cd.kg P ₂ O ₅ ⁻¹	20	-1%	-3%	-9%	-13%	-1%	-2%	-11%	-16%

Annexe 6 : Tables des pourcentages de variation (sur la base des distributions et de la moyenne) des concentrations en Cd modélisées dans les matrices sol - culture (pommes de terre, blé (grain)) – lixiviat par rapport à la première année d'apport de référence comparant les flux en Cd apportés par les fertilisants d'origine organique et d'engrais minéraux phosphatés

❖ Matrice sol agricole

Tableau 6-1. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) de l'accumulation du Cd dans le sol en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction des flux en Cd apportés par les fertilisants d'origine organique et d'engrais minéraux phosphatés

	T10ans							T20ans							T60ans							T99ans						
	DCdMF	B	Ph/80b/40	FB	DMF	Ph/80b/20	Nul	DCdMF	B	Ph/80b/40	FB	DMF	Ph/80b/20	Nul	DCdMF	B	Ph/80b/40	FB	DMF	Ph/80b/20	Nul	DCdMF	B	Ph/80b/40	FB	DMF	Ph/80b/20	Nul
Moy	7	4	1	1	0	-1	-3	14	7	3	1	-1	-1	-6	41	21	9	4	-2	-3	-15	63	33	14	7	-3	-4	-23
Min	-10	-21	-28	-25	-24	-35	-56	-19	-37	-43	-40	-45	-55	-81	-43	-63	-64	-65	-74	-80	-95	-56	-68	-74	-77	-79	-83	-95
P025	0	-2	-4	-4	-6	-6	-11	0	-4	-7	-9	-12	-12	-21	-1	-11	-19	-23	-29	-30	-50	-2	-16	-27	-32	-41	-41	-67
P05	1	-1	-2	-3	-4	-4	-8	1	-2	-5	-6	-9	-9	-16	4	-5	-13	-17	-23	-23	-42	6	-7	-18	-24	-32	-33	-58
P10	1	0	-1	-2	-3	-3	-6	3	0	-3	-4	-6	-6	-12	9	1	-7	-11	-16	-17	-33	14	1	-10	-16	-24	-25	-48
P25	3	1	0	0	-1	-1	-4	6	3	0	-1	-3	-3	-8	18	7	1	-3	-8	-9	-22	29	12	1	-4	-12	-13	-33
P50	5	3	1	1	0	0	-2	11	6	2	1	0	0	-4	33	16	7	3	-1	-1	-12	51	25	10	5	-1	-2	-19
P75	9	5	2	2	1	0	-1	18	10	5	3	1	1	-2	52	28	14	9	4	3	-5	81	44	22	15	6	4	-8
P90	14	8	4	3	1	1	0	29	16	9	6	3	3	-1	82	46	25	18	9	8	-3	125	72	40	29	15	12	-5
P95	19	11	6	4	2	2	0	39	22	13	9	5	4	-1	109	64	36	26	14	12	-2	165	97	55	41	22	19	-4
P975	25	15	8	6	4	3	0	50	30	17	12	7	6	-1	136	84	48	35	21	18	-2	203	125	74	55	33	29	-3
P99	34	20	12	8	5	5	0	68	41	24	17	11	10	0	179	112	68	49	31	28	-1	261	167	104	76	50	43	-2
Max	308	237	221	108	99	65	22	587	427	385	213	179	125	47	1253	843	648	497	393	306	111	1495	1057	734	617	463	411	130

*Les cases rosées montrent une variation inférieure ou égale à 10%

DCdMF : Digestat de méthanisation à la ferme lié à la teneur en Cd réglementaire (3 mg.kg⁻¹MS) représentant un flux d'apport de 7,5 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

DMF : Digestat de méthanisation à la ferme lié à la teneur en Cd moyenne observée (0,7 mg.kg⁻¹MS) représentant un flux d'apport de 1,75 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

B : Boues de STEP représentant un flux d'apport de 4,8 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

FB : Fumiers de bovins représentant un flux d'apport de 2,55 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

Ph/80b/40 : engrais minéral phosphaté lié à la teneur en Cd de 40 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ pour une dose d'apport de 80 kg P₂O₅.ha⁻¹ pour un itinéraire en monoculture blé sur un sol pauvrement pourvu en phosphore représentant un flux d'apport de 3,20 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

Ph/80b/20 : engrais minéral phosphaté lié à la teneur en Cd de 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ pour une dose d'apport de 80 kg P₂O₅.ha⁻¹ pour un itinéraire en monoculture blé sur un sol pauvrement pourvu en phosphore représentant un flux d'apport de 1,60 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

Nul : aucun flux d'apport en Cd *via* les intrants agronomiques (les apports en cadmium dans ce scénario sont uniquement liés aux dépôts atmosphériques et eaux d'irrigation s'ajoutant à la présence du fond géochimique).

❖ Matrice culture (grain de blé)

Tableau 6-2. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) du transfert du Cd vers le grain de blé en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction des flux en Cd apportés par les fertilisants d'origine organique et d'engrais minéraux phosphatés

	T10ans							T20ans							T60ans							T99ans						
	DCdMF	B	Ph/80b/40	FB	DMF	Ph/80b/20	Nul	DCdMF	B	Ph/80b/40	FB	DMF	Ph/80b/20	Nul	DCdMF	B	Ph/80b/40	FB	DMF	Ph/80b/20	Nul	DCdMF	B	Ph/80b/40	FB	DMF	Ph/80b/20	Nul
Moy	7	4	1	1	0	-1	-3	15	8	3	1	-1	-1	-6	43	22	9	4	-2	-3	-16	67	34	14	7	-3	-4	-24
Min	-10	-22	-29	-25	-25	-36	-58	-20	-39	-44	-41	-46	-57	-81	-45	-65	-66	-66	-75	-81	-95	-58	-69	-75	-78	-80	-85	-96
P025	0	-2	-4	-5	-6	-6	-11	0	-4	-8	-9	-12	-12	-20	-1	-11	-20	-23	-30	-31	-51	-2	-17	-28	-33	-42	-43	-68
P05	1	-1	-2	-3	-4	-5	-8	1	-2	-5	-7	-9	-9	-16	4	-5	-13	-17	-24	-24	-43	7	-7	-19	-25	-33	-34	-59
P10	1	0	-1	-2	-3	-3	-6	3	0	-3	-4	-6	-7	-12	9	1	-7	-11	-17	-18	-35	14	1	-11	-16	-25	-26	-50
P25	3	1	0	0	-1	-2	-4	6	3	0	-1	-3	-3	-8	19	8	1	-3	-8	-9	-23	30	12	1	-5	-12	-14	-34
P50	6	3	1	1	0	0	-2	12	6	2	1	0	0	-4	34	17	7	3	-1	-1	-13	54	27	11	5	-1	-2	-20
P75	9	5	2	2	1	0	-1	19	10	5	3	1	1	-2	55	30	15	10	4	3	-5	85	46	23	16	6	5	-8
P90	15	8	4	3	2	1	0	30	17	9	6	3	3	-1	86	49	26	19	10	8	-3	132	76	41	30	15	13	-5
P95	20	11	6	5	2	2	0	41	23	13	10	5	4	-1	115	67	38	27	15	13	-3	175	103	58	43	23	20	-4
P975	26	15	9	6	4	3	0	53	32	18	13	8	6	-1	145	89	50	37	22	19	-2	217	133	78	58	35	31	-4
P99	35	21	12	9	6	5	0	72	43	25	18	11	10	0	191	118	72	52	33	29	-1	280	178	110	80	53	46	-2
Max	332	254	236	114	104	68	23	642	463	417	228	190	133	45	1401	932	710	541	426	329	118	1682	1176	808	676	504	446	137

*Les cases rosées montrent une variation inférieure ou égale à 10%

DCdMF : Digestat de méthanisation à la ferme lié à la teneur en Cd réglementaire (3 mg.kg⁻¹MS) représentant un flux d'apport de 7,5 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

DMF : Digestat de méthanisation à la ferme lié à la teneur en Cd moyenne observée (0,7 mg.kg⁻¹MS) représentant un flux d'apport de 1,75 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

B : Boues de STEP représentant un flux d'apport de 4,8 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

FB : Fumiers de bovins représentant un flux d'apport de 2,55 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

Ph/80b/40 : engrais minéral phosphaté lié à la teneur en Cd de 40 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ pour une dose d'apport de 80 kg P₂O₅.ha⁻¹ pour un itinéraire en monoculture blé sur un sol pauvrement pourvu en phosphore représentant un flux d'apport de 3,20 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

Ph/80b/20 : engrais minéral phosphaté lié à la teneur en Cd de 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ pour une dose d'apport de 80 kg P₂O₅.ha⁻¹ pour un itinéraire en monoculture blé sur un sol pauvrement pourvu en phosphore représentant un flux d'apport de 1,60 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

Nul : aucun flux d'apport en Cd *via* les intrants agronomiques (les apports en cadmium dans ce scénario sont uniquement liés aux dépôts atmosphériques et eaux d'irrigation s'ajoutant à la présence du fond géochimique).

❖ Matrice lixiviat

Tableau 6-3. Présentation du pourcentage de variation (%) (sur la base de la distribution et la moyenne) du transfert du Cd vers le lixiviat en fonction du temps de projection (10, 20, 60, 99 ans) par rapport à la première année d'apport référence, et en fonction des flux en Cd apportés par les fertilisants d'origine organique et d'engrais minéraux phosphatés

	T10ans							T20ans							T60ans							T99ans						
	DCdMF	B	Ph/80b/40	FB	DMF	Ph/80b/20	Nul	DCdMF	B	Ph/80b/40	FB	DMF	Ph/80b/20	Nul	DCdMF	B	Ph/80b/40	FB	DMF	Ph/80b/20	Nul	DCdMF	B	Ph/80b/40	FB	DMF	Ph/80b/20	Nul
Moy	15	11	9	8	7	7	4	22	16	10	8	6	6	1	51	30	16	11	5	4	-9	75	41	21	15	5	3	-17
Min	-84	-81	-80	-78	-83	-79	-85	-74	-78	-80	-83	-81	-83	-80	-79	-80	-83	-82	-84	-81	-95	-75	-86	-82	-85	-86	-88	-96
P025	-50	-52	-53	-53	-53	-53	-54	-48	-51	-53	-53	-53	-53	-56	-40	-47	-51	-55	-57	-57	-65	-36	-47	-53	-55	-59	-60	-74
P05	-43	-45	-45	-46	-46	-45	-48	-40	-43	-45	-46	-47	-47	-50	-31	-39	-43	-47	-49	-50	-59	-25	-38	-45	-48	-52	-53	-67
P10	-33	-35	-37	-38	-38	-37	-39	-30	-34	-37	-37	-38	-38	-42	-19	-29	-35	-38	-41	-42	-51	-12	-26	-35	-39	-43	-45	-59
P25	-16	-19	-21	-21	-21	-21	-23	-11	-16	-20	-21	-23	-22	-27	3	-9	-17	-21	-24	-25	-36	15	-4	-16	-20	-27	-27	-43
P50	7	3	1	0	0	0	-3	13	8	2	1	-1	-1	-6	36	19	7	2	-3	-4	-16	53	27	10	5	-3	-5	-23
P75	35	32	28	27	26	26	23	45	37	30	28	25	26	20	80	54	38	33	26	24	9	110	70	44	36	26	23	2
P90	72	66	62	60	58	59	56	84	73	64	61	57	59	50	137	103	76	69	60	58	39	182	124	87	77	61	57	29
P95	101	91	87	87	84	86	82	116	102	91	88	83	85	75	183	138	107	100	87	83	62	242	167	121	109	91	84	51
P975	129	121	118	114	110	113	108	150	133	120	117	112	113	101	233	176	139	131	111	111	86	309	211	162	148	121	114	76
P99	170	162	164	161	151	155	147	201	173	160	156	151	153	141	305	237	193	173	146	153	119	407	278	219	197	168	160	111
Max	530	579	533	541	411	313	479	590	513	854	348	436	449	349	1386	857	461	837	493	721	295	1465	1145	844	1351	580	715	361

DCdMF : Digestat de méthanisation à la ferme lié à la teneur en Cd réglementaire (3 mg.kg⁻¹MS) représentant un flux d'apport de 7,5 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

DMF : Digestat de méthanisation à la ferme lié à la teneur en Cd moyenne observée (0,7 mg.kg⁻¹MS) représentant un flux d'apport de 1,75 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

B : Boues de STEP représentant un flux d'apport de 4,8 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

FB : Fumiers de bovins représentant un flux d'apport de 2,55 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

Ph/80b/40 : engrais minéral phosphaté lié à la teneur en Cd de 40 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ pour une dose d'apport de 80 kg P₂O₅.ha⁻¹ pour un itinéraire en monoculture blé sur un sol pauvrement pourvu en phosphore représentant un flux d'apport de 3,20 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

Ph/80b/20 : engrais minéral phosphaté lié à la teneur en Cd de 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ pour une dose d'apport de 80 kg P₂O₅.ha⁻¹ pour un itinéraire en monoculture blé sur un sol pauvrement pourvu en phosphore représentant un flux d'apport de 1,60 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹

Nul : aucun flux d'apport en Cd *via* les intrants agronomiques (les apports en cadmium dans ce scénario sont uniquement liés aux dépôts atmosphériques et eaux d'irrigation s'ajoutant à la présence du fond géochimique).