

Le directeur général

Maisons-Alfort, le 17 juin 2019

AVIS

de l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail

relatif à l'Exposition au cadmium (CAS n°7440-43-9) – 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.

L'Anses met en œuvre une expertise scientifique indépendante et pluraliste.

L'Anses contribue principalement à assurer la sécurité sanitaire dans les domaines de l'environnement, du travail et de l'alimentation et à évaluer les risques sanitaires qu'ils peuvent comporter.

Elle contribue également à assurer d'une part la protection de la santé et du bien-être des animaux et de la santé des végétaux et d'autre part à l'évaluation des propriétés nutritionnelles des aliments.

Elle fournit aux autorités compétentes toutes les informations sur ces risques ainsi que l'expertise et l'appui scientifique technique nécessaires à l'élaboration des dispositions législatives et réglementaires et à la mise en œuvre des mesures de gestion du risque (article L.1313-1 du code de la santé publique).

Ses avis sont publiés sur son site internet.

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.

1. CONTEXTE ET OBJET DE LA SAISINE

Le cadmium est un élément trace métallique ubiquitaire présent dans les différents compartiments de l'environnement (sols, eaux, air) du fait de sa présence à l'état naturel dans la croûte terrestre et des apports anthropiques liés aux activités industrielles et agricoles. Le cadmium pénètre facilement dans les végétaux par leurs racines et entre ainsi dans la chaîne alimentaire.

Le cadmium métal a été classé « cancérigène pour l'Homme » (groupe 1) par le Centre International de Recherche sur le Cancer (CIRC) en 2012. Il est également classé cancérigène de catégorie 1B, mutagène sur les cellules germinales de catégorie 2 et toxique pour la reproduction de catégorie 2 selon le règlement européen CLP¹. Par ailleurs, le cadmium est connu pour induire

¹ Le règlement CLP (en anglais : Classification, Labelling, Packaging) désigne le règlement (CE) n° 1272/2008 du Parlement européen relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances chimiques et des mélanges.

chez l'Homme une atteinte tubulaire rénale et une fragilité osseuse, suite à une exposition prolongée par voie orale. Des troubles de la reproduction ont également été rapportés.

Le Comité mixte d'experts FAO/OMS sur les additifs alimentaires et les contaminants (JECFA) a, en 2010, fixé comme valeur toxicologique de référence (VTR) par ingestion, la dose mensuelle tolérable provisoire (DMTP) de 25 µg.kg⁻¹ de poids corporel. En 2011, l'Autorité européenne de sécurité des aliments (EFSA) a retenu une dose hebdomadaire tolérable (DHT) de 2,5 µg.kg⁻¹ de poids corporel, identique à celle qu'elle avait établie précédemment en 2009.

En outre, l'action 24 du Plan national santé environnement 2015-2019 (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.

La source principale d'exposition de la population générale au cadmium est l'alimentation, hors tabagisme (Efsa, 2009, 2012). Selon l'avis et le rapport de l'Anses relatifs à la deuxième étude de l'alimentation totale (EAT2) de juin 2011 (Anses, 2011a)², l'exposition alimentaire des personnes en France au cadmium apparaît en augmentation par rapport à la précédente EAT parue en 2004. Un dépassement de la DHT définie par l'EFSA en 2009 est constaté chez 0,6% des adultes et 15% des enfants. Plus récemment, l'étude de l'alimentation totale infantile (EATi) publiée en septembre 2016 (Anses, 2016)³ fait le même constat que l'EAT2, à savoir que le risque sanitaire lié au cadmium ne peut être écarté pour les enfants de moins de trois ans. Suite à la 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.

Au niveau de l'Union européenne (UE), 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 maximale réglementaire en cadmium de 90 mg Cd.kg⁻¹ en masse d'équivalent d'anhydride phosphorique (P₂O₅). Cependant, un projet de nouveau règlement européen, élargi à l'ensemble des matières fertilisantes (engrais minéraux et organiques, amendements minéraux et organiques) et supports de cultures, est en cours d'élaboration. Il vise à fixer des 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 pour évaluation notamment concernant un éventuel risque sanitaire, au Comité scientifique des risques sanitaires et environnementaux (SCHER) l'étude publiée en 2013 par

² 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.

³ 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.

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

Fertilizer Europe⁵ (représentant les principaux fabricants d'engrais minéraux en Europe (28 Etats membres + la Norvège). 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 relatives 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 informations, l'Anses est saisie pour émettre un avis sur les questions suivantes :

1. Pour ce qui concerne les populations riveraines de sites pollués susceptibles d'être surexposées au cadmium :
 - a) Quelles VTR 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 de la prise en charge sanitaire ?
2. Pour ce qui concerne 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 Santé publique France) :
 - 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 susmentionnés et la spécificité de ces produits, de maîtriser la pollution des sols agricoles et la contamination des productions végétales ?

Un schéma conceptuel résumant l'ensemble des questions figure en annexe 1 de cet avis.

A l'issue d'un point d'étape avec les ministères signataires de la saisine, il a été convenu de recentrer la question 2 uniquement sur la population des travailleurs en contact avec des MFSC et de ne pas considérer dans les travaux d'expertise la problématique liée aux sites et sols pollués. Cet accord figure dans les deux avenants au contrat d'expertise.

2. ORGANISATION DE L'EXPERTISE

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) ».

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'expertise collective relève du domaine de compétences du comité d'experts spécialisés (CES) « Caractérisation des dangers des substances et valeurs toxicologiques de référence » (CES Substances) et du CES « Valeurs sanitaires de référence » (CES VSR) depuis septembre 2017. Les travaux ont été présentés aux CES tant sur les aspects méthodologiques que scientifiques.

L'Anses a confié l'expertise à des experts rapporteurs des CES « Evaluation des risques physico-chimiques liés aux aliments » (CES ERCA), « Expertise en vue de la fixation de valeurs limites à des agents chimiques en milieu professionnel » (CES VLEP), « Matière fertilisantes et supports de culture » (CES MFSC), du CES Substances et du CES VSR.

Concernant les deux premières questions (1a et 1b) : les travaux des experts rapporteurs ont fait l'objet d'une présentation au CES ERCA et au CES VLEP lors des réunions des 12 octobre 2015 et 8 mars 2016, respectivement. Le rapport d'expertise collective portant sur ces deux questions a été validé le 23 novembre 2017 par le CES VSR. Il est à noter qu'un expert du CES VSR a exprimé un avis divergent sur le rapport d'expertise collective de la question 1. Sa position est détaillée dans la partie « Positions divergentes » du rapport d'expertise collective.

Concernant la question 2 : les travaux des experts rapporteurs ont fait l'objet d'une présentation devant le CES Substances lors de la réunion du 12 mai 2016 et devant le CES VSR lors des réunions des 16 octobre 2017, 18 octobre 2018 et 29 novembre 2018. Le rapport d'expertise collective relatif à la question 2 a été validé le 29 novembre 2018 par le CES VSR.

Concernant la question 3 : les travaux des experts rapporteurs ont fait l'objet de plusieurs présentations devant le CES ERCA, le CES Substances, le CES VSR et le CES MFSC entre septembre 2016 et juin 2018. Les travaux liés à cette question et le rapport d'expertise collective ont fait l'objet d'une validation le 20 juin 2018 par le CES ERCA et ont été endossés par le CES VSR le 22 juin 2018.

Le présent avis se fonde pour les aspects scientifiques :

- question 1, sur le rapport intitulé : « Exposition au cadmium. Propositions de valeurs toxicologiques de référence par ingestion, de valeurs sanitaires repères dans les milieux biologiques (sang, urines, ...) (novembre 2017) » ;
- question 2 sur le rapport intitulé : « Fabrication et utilisation des matières fertilisantes et supports de culture (MFSC) : Evaluation des expositions au cadmium en milieu professionnel (novembre 2018) » ;
- question 3 sur le rapport intitulé : « 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 (juin 2018) ».

Le présent avis a été validé le 29 novembre 2018 par le CES VSR. Il est à noter que deux experts du CES se sont abstenus lors de la validation finale de l'avis. Leurs abstentions sont motivées par le fait qu'ils n'ont pas participé aux travaux et discussions relatives à la question 1, ayant abouti à retenir les effets osseux comme effets critiques pour l'élaboration de la VTR par ingestion.

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 rendues publiques *via* le site internet de l'Anses (www.anses.fr).

3. ANALYSE ET CONCLUSIONS DES CES

3.1. Question 1 : Etablissement d'une valeur toxicologique de référence (VTR) par ingestion (adultes, enfants, ...) et choix des valeurs sanitaires repères du cadmium à retenir dans les milieux biologiques (sang, urines, ...), selon l'âge

3.1.1. Quelle valeur toxicologique de référence par ingestion (adultes, enfants, ...) faut-il retenir dans le cadre de la réalisation des évaluations quantitatives des risques sanitaires?

3.1.1.1. Préambule

Une valeur toxicologique de référence, ou VTR, est un indice toxicologique qui permet de qualifier ou de quantifier un risque pour la santé humaine. Elle établit le lien entre une exposition à une substance toxique et l'occurrence d'un effet sanitaire indésirable. Les VTR sont spécifiques d'une durée d'exposition (aiguë, subchronique ou chronique) et d'une voie d'exposition (orale ou respiratoire). La construction des VTR diffère en fonction des connaissances ou des hypothèses formulées sur les mécanismes d'action des substances. Actuellement, l'hypothèse par défaut est de considérer une relation monotone entre l'exposition, ou la dose, et l'effet, ou la réponse. En l'état actuel des connaissances et par défaut, on considère généralement que, pour les effets non cancérogènes, la toxicité ne s'exprime qu'au-delà d'un seuil de dose (Anses, 2017). En pratique, la construction de VTR comprend les étapes suivantes :

- choix de l'effet critique ;
- choix d'une étude de bonne qualité scientifique permettant généralement d'établir une relation dose – réponse parmi un ensemble d'études de bonne qualité ;
- choix ou construction d'une dose critique à partir des doses expérimentales et/ou des données épidémiologiques ;
- application de facteurs d'incertitude à la dose critique pour tenir compte des incertitudes pour les VTR à seuil ;
- réalisation d'une extrapolation linéaire à l'origine afin de déterminer un excès de risque unitaire pour les VTR sans seuil.

L'élaboration des VTR suit une approche très structurée et exigeante s'appuyant sur une expertise méthodologique ad hoc développée par l'Anses (Anses, 2017) en accord avec les standards internationaux.

3.1.1.2. Profil toxicologique du cadmium

L'absorption du cadmium après une exposition alimentaire chez l'Homme est relativement faible (3 à 5%), mais, chez l'Homme, le cadmium est efficacement retenu dans les reins et le foie, avec une très longue demi-vie biologique allant de 10 à 30 ans.

Le cadmium est principalement toxique pour les reins, en particulier pour les cellules tubulaires proximales, où son accumulation peut provoquer un dysfonctionnement rénal. Le cadmium peut également provoquer des effets osseux : de type notamment déminéralisation osseuse, soit par lésion osseuse directe, soit indirectement par suite d'un dysfonctionnement rénal, entraînant un

risque augmenté de fractures. Après une exposition prolongée et/ou importante, les lésions initialement tubulaires peuvent se compléter d'une diminution du débit de filtration glomérulaire, susceptible d'évoluer vers une insuffisance rénale.

Le cadmium entraîne également des effets reprotoxiques. Plusieurs études récentes menées chez des femmes enceintes (Lin, 2011 ; Tian *et coll.*, 2009 ; Kippler *et coll.*, 2012 ; Gardner, 2013 ; Sun, 2014) rapportent une diminution du périmètre crânien chez les nouveau-nés, suite à une exposition de la mère au cadmium. Ces mêmes études suggèrent également une diminution de la taille et du poids des enfants, relevée lors d'un suivi médical jusqu'à 3 ou 5 ans.

Quelques études épidémiologiques suggèrent également l'existence de troubles neurocognitifs discrets, induits par l'exposition environnementale et/ou alimentaire au cadmium. Ces travaux sont toutefois encore en nombre insuffisant pour constituer un niveau de preuve épidémiologique fort.

Des études menées sur des populations adultes composées cette fois-ci d'hommes et de femmes démontrent un lien entre l'exposition au cadmium et le développement de l'athérosclérose d'une part, et une augmentation de la prévalence des maladies vasculaires en lien avec l'athérosclérose d'autre part. Ces effets cardiovasculaires ont été observés à des doses d'exposition similaires à celles mettant en évidence les effets osseux et les effets rénaux.

Par voie orale, le cadmium entre dans le tractus gastro-intestinal via l'alimentation ou l'ingestion d'eau. Le cadmium peut ensuite se lier aux protéines plasmatiques (par exemple l'albumine), les érythrocytes et les métallothionéines. A partir de ce compartiment sanguin, le cadmium est distribué au niveau hépatique, rénal et dans d'autres tissus. L'élimination se fait via les fèces et les urines.

Le cadmium a été classé dès 1993 par le CIRC dans le groupe 1 « cancérogène pour l'Homme » pour ses effets cancérogènes au niveau du poumon chez les travailleurs exposés (IARC, 1993). Cette classification a été revue et confirmée dans le cadre d'une mise à jour et d'une réévaluation de tous les composés du groupe 1 des monographies du CIRC (IARC, 2012).

Selon le règlement CLP⁸, le cadmium est classé cancérogène (catégorie 1B), mutagène sur les cellules germinales (catégorie 2) et toxique pour la reproduction (catégorie 2).

3.1.1.3. VTR chronique par voie orale

3.1.1.3.1. Choix de l'effet critique

La toxicité chronique du cadmium chez l'Homme a été très étudiée en milieu professionnel depuis les premières publications de Friberg en 1950 (EFSA, 2009a).

Des études épidémiologiques au sein de la population générale ont été conduites ultérieurement.

La toxicité du cadmium a fait l'objet de plusieurs synthèses (OMS/IPCS, 1992 ; EC, 2007) et de nombreuses publications scientifiques. Leurs conclusions sont les suivantes : les effets critiques de l'exposition au cadmium touchent majoritairement la fonction rénale et le tissu osseux et peuvent s'exprimer à partir de seuils de cadmiurie (CdU) de 1 µg.g⁻¹ de créatinine pour les effets rénaux et 0,5 µg.g⁻¹ de créatinine pour les effets osseux.

Les seuils de survenue des effets sur le système cardiovasculaire seraient de 2 µg CdU.g⁻¹ de créatinine. Les données sont insuffisantes actuellement pour déterminer les seuils de survenue d'un effet reprotoxique et les effets sur le neurodéveloppement décrits expérimentalement et retrouvés dans les études épidémiologiques. Il en est de même des effets cancérogènes

⁸ Le règlement CLP (en anglais : Classification, Labelling, Packaging) désigne le règlement (CE) n° 1272/2008 du Parlement européen relatif à la classification, à l'étiquetage et à l'emballage des substances chimiques et des mélanges.

(hormono-dépendants, testiculaire, prostatique, rénal, ...) pouvant toucher les individus non professionnellement exposés (CIRC, 2012).

Le CES retient comme effet critique les effets osseux qui sont considérés comme les effets les plus sensibles documentés à ce jour.

3.1.1.3.2. Recueil et analyse des VTR existantes

Actuellement, plusieurs VTR chroniques par voie orale toutes basées sur les effets rénaux sont disponibles (EFSA, 2009a ; JECFA, 2010 ; ATSDR, 2012) (cf. Tableau 1).

Tableau 1. VTR chroniques par voie orale proposées par le JECFA (2010), l'EFSA (2009), et l'ATSDR (2012)

	JECFA (2010)	EFSA (2009)	ATSDR (2012)
Effets critiques	Effets rénaux (atteinte tubulaire rénale)		
Etude clé	Analyse poolée de l'EFSA (35 études épidémiologiques)		Jarüp <i>et coll.</i> , 2000
Evaluation de la protéinurie tubulaire et de la cadmiurie	β2-microglobuline, Cadmium urinaire (CdU) en µg.g ⁻¹ de créatinine Exclusivement population ≥ 50 ans		protéines de faible poids moléculaire
CdU critique µg/g créatinine	5,24 (4,94-5,57) µg.g ⁻¹ créatinine (point de rupture de pente)	4 (BMDL ₅) facteur d'ajustement 3,9 1 µg.g ⁻¹ créatinine	0,5 µg.g ⁻¹ créatinine
Modèle d'évaluation du Cd alimentaire	Amzal <i>et coll.</i> , 2009 adapté (demi-vie Cd)	Amzal <i>et coll.</i> , 2009	Kjellstrom <i>et Nordberg</i> , 1978
VTR (voie orale)	Dose mensuelle tolérable provisoire (DMTP) : 25 µg.kg ⁻¹ pc.mois ⁻¹ Dose hebdomadaire tolérable provisoire (DHTP) : 5,6 µg.kg ⁻¹ pc.sem ⁻¹	Dose hebdomadaire tolérable (DHT) : 2,5 µg.kg ⁻¹ pc.sem ⁻¹ Dose journalière tolérable (DJT) : 0,36 µg.kg ⁻¹ pc.j ⁻¹	Minimal Risk Level (MRL) : 0,1 µg.kg ⁻¹ pc.j ⁻¹

Le CES n'a pas retenu les VTR existantes car elles ne sont pas basées sur l'effet critique choisi et s'oriente vers la construction d'une nouvelle VTR.

3.1.1.3.3. Construction d'une nouvelle VTR par voie orale

- Choix de l'effet critique et de l'étude clé

Les experts ont retenu les études épidémiologiques d'Engström *et coll.* (2011 et 2012) comme études clés. Ces études mettent en évidence une corrélation entre une exposition au cadmium et une baisse de la densité osseuse (pouvant entraîner une augmentation du risque d'ostéoporose ou de fractures) chez des femmes suédoises âgées de 56 à 69 ans (2 688 individus). Cette association a également été démontrée chez les hommes (âge > 69 ans) selon une étude récente (Wallin *et coll.*, 2016).

- Choix de la concentration critique

Les experts ont analysé la relation entre une exposition prolongée au cadmium et un risque d'ostéoporose ou de fractures osseuses à partir des articles d'Engström *et coll.* (2011 et 2012). La concentration en cadmium urinaire de $0,5 \mu\text{g.g}^{-1}$ de créatinine correspond à un NOAEL⁹ et a été choisie comme concentration critique pour dériver la VTR.

- Calcul de la VTR

L'exposition orale suite à l'ingestion de denrées alimentaires représente la source principale d'exposition au cadmium chez les non-fumeurs. C'est la raison pour laquelle les experts ont choisi de construire une VTR par voie orale en utilisant le modèle pharmacocinétique physiologique (PBPK) de Kjellström et Nordberg (Kjellström et Nordberg, 1978) (cf. Annexe 8 du rapport) qui permet de faire le lien entre les concentrations urinaires de cadmium et les valeurs d'exposition par voie orale.

Ce modèle permet de simuler l'absorption, l'accumulation et l'élimination du cadmium à travers huit compartiments qui incluent les poumons, le tractus gastro-intestinal, le sang (lui-même divisé en trois compartiments, le plasma, les érythrocytes et la métallothionéine), le foie, les reins et les « autres tissus ».

Ce modèle PBPK permet également d'estimer l'évolution de la concentration urinaire limite de cadmium (en $\mu\text{g.g}^{-1}$ de créatinine en fonction de l'âge) à ne pas dépasser afin d'éviter d'atteindre un dépassement de la concentration critique retenue ($0,5 \mu\text{g.g}^{-1}$ de créatinine à 60 ans) (cf. Annexe 7 - figure 3). La capacité prédictive du modèle PBPK a déjà fait l'objet d'une expertise par l'ATSDR (ATSDR, 2012) et l'Anses (Anses, 2012).

Au regard de l'étude de Chaumont *et coll.* (2013) relative à la population belge, il convient de préciser qu'en l'absence de données d'exposition externe relatives à la Belgique, il n'est pas possible de vérifier la capacité prédictive de ce modèle PBPK, c'est-à-dire le lien entre exposition externe (alimentation) et dose interne (cadmiurie), pour cette population.

La construction de la VTR du cadmium par voie orale reposant sur des études épidémiologiques menées sur la population générale, il a été décidé de ne pas appliquer de facteur d'incertitude supplémentaire.

- Proposition de VTR chronique par voie orale

A partir du modèle PBPK cité ci-dessus, une VTR par voie orale a pu être dérivée.

Ainsi, une **Dose Journalière Tolérable (DJT) par voie orale de $0,35 \mu\text{g Cd.kg pc}^{-1}.\text{j}^{-1}$** ou une **Dose hebdomadaire tolérable (DHT) par voie orale de $2,45 \mu\text{g Cd.kg pc}^{-1}.\text{sem}^{-1}$** est compatible avec une **concentration urinaire de cadmium n'excédant pas $0,5 \mu\text{g.g}^{-1}$ de créatinine, chez un adulte de 60 ans** en supposant que l'ingestion soit la seule source d'exposition de cadmium.

⁹ No Observed (Adverse) Effect Level (= Dose maximale n'entraînant pas d'effet néfaste observé)

Tableau 2. VTR chronique par voie orale basée sur des effets osseux

Effet critique	Concentration critique	VTR
Risque d'ostéoporose ou de fractures osseuses Engström <i>et coll.</i> (2011 et 2012)	Cadmium urinaire = 0,5 µg.g ⁻¹ de créatinine à 60 ans <u>Modélisation PBPK</u>	VTR = 0,35 µg Cd.kg pc ⁻¹ .j ⁻¹

- Niveau de confiance

Le niveau de confiance global a été attribué à cette VTR en se basant sur les critères suivants :

- Niveau de confiance de la base de données : fort
- Niveau de confiance dans le choix de l'effet critique et le mode d'action : moyen.

La toxicité du cadmium sur l'os est établie, mais elle est encore peu documentée. Le mode d'action aux faibles doses n'est pas complètement élucidé.

- Niveau de confiance dans le choix de l'étude clé : fort.

Les études épidémiologiques d'Engström *et coll.* (2011 et 2012) sont très détaillées et bien argumentées. Elles ont été jugées robustes par les experts.

- Niveau de confiance dans le choix de la concentration critique : moyen.

N'ayant pas accès aux données individuelles, il n'a pas été possible de dériver une BMD à partir des études épidémiologiques d'Engström *et coll.* (2011 et 2012).

Un niveau de confiance global **moyen-fort** a été attribué à cette VTR.

3.1.2. Quelles valeurs sanitaires repères du cadmium faut-il retenir dans les milieux biologiques (sang, urines, ...), selon l'âge, dans le cadre de la prise en charge sanitaire?

Le modèle PBPK (Kjellström & Norberg, 1978) a également été utilisé pour estimer l'évolution de la concentration urinaire limite de cadmium à ne pas dépasser, dès la naissance, afin d'éviter d'atteindre un dépassement de la VTR interne (0,5 µg.g⁻¹ de créatinine) à l'âge de 60 ans.

La figure 3 et le tableau 13 du rapport (cf. Annexe 7 du rapport d'expertise) correspondent à une estimation des concentrations urinaires de cadmium (en µg/g de créatinine) en fonction de l'âge.

Les valeurs reportées (à ne pas dépasser afin de respecter la VTR de 0,5 µg.g⁻¹ de créatinine à l'âge de 60 ans) (cf. tableau 13) sont données à titre indicatif et doivent être interprétées au regard des valeurs estimées du poids corporel et de l'estimation de l'excrétion journalière de la créatinine urinaire.

3.1.3. Conclusions et recommandations du CES concernant la question 1

Le CES VSR recommande:

- des valeurs sanitaires repères du cadmium urinaire (en µg.g⁻¹ de créatinine en fonction de l'âge) à ne pas dépasser afin de respecter la VTR interne de 0,5 µg.g⁻¹ de créatinine à l'âge de 60 ans (cf. Annexe 2) ;
- une VTR chronique du cadmium par ingestion de 0,35 µg Cd.kg p.c⁻¹.j⁻¹ (équivalent à une DHT de 2,45 µg Cd.kg p.c⁻¹.sem⁻¹). Par définition, les VTR s'appliquent à l'ensemble de la population, y compris aux populations sensibles (Anses, 2017¹⁰).

Tableau 3. VTR chronique par voie orale basée sur des effets osseux

Effet critique	Concentration critique	VTR
Risque d'ostéoporose ou de fractures osseuses Engström <i>et coll.</i> (2011 et 2012)	Cadmium urinaire = 0,5 µg.g ⁻¹ de créatinine à 60 ans <u>Modélisation PBPK</u>	VTR = 0,35 µg Cd.kg pc ⁻¹ .j ⁻¹ Niveau de confiance Moyen-Fort

¹⁰ Valeurs toxicologiques de référence (VTR) - Guide d'élaboration de VTR de l'Anses - Mission permanente- Saisine n° 2017-SA-0016. Troisième édition

3.2. Question 2 : Exposition des populations de travailleurs en contact avec des matières fertilisantes et supports de culture (MFSC), potentiellement contaminées par du cadmium

La population des travailleurs en contact avec des matières fertilisantes et supports de cultures (MFSC) correspond à des professionnels des secteurs d'activité produisant ou utilisant ces dernières. Les matières fertilisantes prises en compte dans les travaux d'expertise comprennent à la fois les engrais (organiques, inorganiques, organo-minéraux) destinés à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux et les amendements (organiques, inorganiques, organo-minéraux) permettant d'améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols (cf Annexe 3). Le cadmium est un contaminant naturel des roches phosphatées utilisées pour la production des engrais phosphatés.

Par ailleurs, le cadmium peut être également quantifié dans des eaux de lixiviation et des eaux usées à retraiter. De ce fait, *in fine*, le cadmium peut être retrouvé dans des boues de station d'épuration (STEP). A la suite de transferts sol-plante, le cadmium est également identifiable dans des composts.

3.2.1. Q2a : Les risques liés à l'exposition au cadmium dans la filière des MFSC sont-ils bien évalués au titre des réglementations santé et sécurité au travail (à l'aide d'une enquête de filière par exemple)?

Une étude de filière portant sur les travailleurs au contact des MFSC a été réalisée prenant en compte : une analyse de la littérature scientifique, la réalisation d'auditions, des consultations de parties prenantes, une exploitation de la base de données COLCHIC (Système de COLlecte des données d'exposition CHImiques des laboratoires des Caisses régionales d'assurance maladie) de l'INRS¹¹, la réalisation d'enquêtes par questionnaires et des visites sur site incluant éventuellement la réalisation de mesurages.

Cette étude de filière a permis de mettre en évidence que, les risques chimiques pris en compte pour ces professionnels, sont ceux liés à des expositions aux poussières de façon globale, mais pas spécifiquement au cadmium. En effet, ces professionnels sont exposés de façon indirecte, le cadmium étant présent en tant que contaminant/impureté au sein des différentes MFSC. Ainsi, au regard de la faible teneur en cadmium, les fiches de données de sécurité (FDS) qui fournissent des informations sur la composition chimique des engrais phosphatés n'ont pas l'obligation de mentionner la présence de cadmium (car la concentration en cadmium est inférieure à 0,1%). Toutefois, dans la mesure où certaines MFSC sont des agents chimiques dangereux, les règles générales de prévention du risque chimique en milieu professionnel s'appliquent¹². Néanmoins, du fait de la faible teneur des engrais en cadmium, ils échappent aux dispositions réglementaires relatives aux substances cancérigènes, mutagènes ou toxiques pour la reproduction et aucun suivi individuel renforcé spécifique de ces travailleurs pour le cadmium n'est imposé par le code du travail.

¹¹ Institut national de recherche et de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles

¹² Décret n° 2003-1254 du 23 décembre 2003 relatif à la prévention du risque chimique (R. 231-54 à R. 231-54-17)

3.2.2. Q2b : Pour ce qui concerne les travailleurs, quels sont les niveaux de contamination qui pourraient être estimés selon les activités ou situations professionnelles ?

L'étude de filière MFSC suggère que les secteurs industriels inclus dans la filière MFSC et pour lesquels les travailleurs sont susceptibles d'être exposés au cadmium sont les suivants :

- le secteur des engrais phosphatés (depuis le débarquement des matières premières importées (roches phosphatées) jusqu'à la commercialisation et la distribution des produits finis (engrais) ;
- les secteurs industriels générant et épandant des matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR) (professionnels en contact avec des boues de STEP, professionnels réalisant l'épandage des MAFOR, élevages agricoles, etc.) ;
- les utilisateurs de MFSC (agriculteurs, agents chargés de l'entretien des espaces verts...).

3.2.2.1. Méthodologie utilisée pour l'estimation des niveaux d'imprégnation des professionnels

En milieu professionnel, l'exposition au cadmium et à ses composés peut se faire par les voies respiratoires mais également *via* des ingestions accidentelles de poussières à partir des mains contaminées et de la nourriture¹³. Dans la mesure où le cadmium entraîne des effets systémiques (notamment des effets cancérigènes et rénaux) et que l'exposition professionnelle au cadmium peut impliquer des voies d'exposition autres que la voie inhalatoire, le recours à la surveillance biologique des expositions est la méthode à utiliser préférentiellement pour l'évaluation des expositions, parce qu'elle permet une évaluation de la dose interne en cadmium réellement absorbée. Ceci est d'autant plus important que le cadmium est un toxique cumulatif, c'est-à-dire dont la toxicité est liée à la dose cumulée dans le temps¹⁴.

Aucune donnée de surveillance biométriologique n'a pu être recensée au cours du présent travail d'expertise. Par conséquent, en l'absence de telles données, les données de concentration atmosphériques en cadmium, lorsqu'elles étaient disponibles, ont été utilisées par défaut pour pouvoir estimer les expositions de ces professionnels au cadmium tout en étant conscient des incertitudes alors existantes quant aux autres voies d'exposition possibles. Des estimations des niveaux d'exposition atmosphérique en cadmium ont également été réalisées dans certains cas à partir de ceux des poussières inhalables dans la mesure où dans la majorité des cas, seules ces données étaient disponibles. Les concentrations atmosphériques en cadmium ont ainsi été estimées par voie indirecte en prenant comme hypothèses les teneurs maximales probables selon les types de MFSC concernées. Dans certains cas, lorsqu'ils l'ont jugé possible, faute de données quantifiées en matière de concentrations atmosphériques en poussières inhalables, les experts ont également eu recours au jugement d'expert pour apprécier les niveaux d'exposition atmosphérique en poussières inhalables, à l'occasion des quelques visites sur site qui ont été réalisées.

¹³ HAS, 2015 - Décision n°2015.0236/DC/SBPP. Recommandation de bonne pratique « Surveillance médicoprofessionnelle des travailleurs exposés ou ayant été exposés à des agents cancérigènes pulmonaires » élaborée par la Société Française de Médecine du Travail-

¹⁴ Société française de médecine du travail. Surveillance biologique des expositions professionnelles aux agents chimiques. Recommandations de bonne pratique TM37. Références en santé travail 2016(146):29.

3.2.2.2. Estimations des niveaux de contamination ayant pu être faites à partir des différents types de données disponibles pour les professionnels en contact avec des MFSC potentiellement contaminés par du cadmium

Travailleurs concernés par la production d'engrais phosphatés

Afin de conforter les rares données atmosphériques retrouvées dans la littérature scientifique (Heederick, 1994), l'Anses a demandé à l'INRS de procéder à une extraction des données de la base COLCHIC. Les résultats fournis ont été obtenus à partir des mesures effectuées par les huit laboratoires interrégionaux des CARSAT/CRAMIF¹⁵ et de l'INRS de 1987 à 2017. Les données exploitées relèvent du secteur de la fabrication de produits azotés et d'engrais (NAF 2015Z). Il s'agit de poussières d'engrais (superphosphate) (CAPROEX POU 107). Une exploitation statistique a été faite à partir de résultats bruts correspondant à la durée de prélèvements non pondérés sur 8 heures et non corrigés par un facteur de protection. Les analyses (cf. annexe 8 du rapport Q2) ont été réalisées en agglomérant les mesures d'exposition (prélèvements individuels – QTI) et les mesures ambiantes (prélèvements à poste fixe – QTA). Cette exploitation porte sur des prélèvements d'une durée supérieure à 60 minutes stratifiés par code tâche pour les poussières inhalables et de manière globale pour le cadmium compte tenu du faible nombre de mesures. Les concentrations atmosphériques en cadmium dans les poussières inhalables, pour la période 1987-2017, pour le secteur de la fabrication de produits azotés et d'engrais, sont comprises entre 0,10 et 3,8 mg/m³ (données COLCHIC).

En 2018, l'Anses a sollicité dans le cadre de cette étude les services de la CARSAT Nord Picardie pour la réalisation de prélèvements de poussières lors des phases de production et de conditionnement d'engrais superphosphates dans une entreprise de fertilisants minéraux et spécialités. L'analyse de ces prélèvements de poussières a révélé des concentrations en cadmium inférieures aux limites de quantification (inférieures à 0,1 µg.m⁻³) pour la population de travailleurs susceptible d'être exposée au cadmium.

Travailleurs concernés par la distribution d'engrais phosphatés

Aucune donnée de contamination atmosphérique en cadmium n'ayant été recensée dans le secteur de la distribution d'engrais phosphatés, une visite d'un silo de stockage d'engrais phosphatés a été effectuée en novembre 2017. La plateforme visitée est située en Meurthe et Moselle, en milieu rural ; elle assure le stockage des céréales récoltées et des engrais destinés à environ une centaine d'agriculteurs. Cette plateforme est alimentée en engrais par péniche jusqu'à un port fluvial puis par camion jusqu'au silo de la coopérative agricole. Le déchargement des péniches s'opère généralement par transbordement direct à l'aide de pelles mécaniques. La période de livraison du port vers le silo peut durer quelques jours généralement entre juin et août. Arrivés sur le site de la coopérative, les camions sont déchargés à l'aide d'une sauterelle (bande transporteuse) qui se déverse dans une case en bois. Cette opération de déchargement des camions avec une sauterelle, dure environ 10 minutes pour un camion de 28 tonnes. Selon le questionnaire du site, cette opération est source d'une émission importante de poussières qui peut nécessiter le port d'un équipement de protection individuelle (EPI) respiratoire.

Le CES n'a pu procéder dans ces conditions qu'à une estimation grossière des niveaux de contamination de l'air ambiant par le cadmium puisqu'aucune donnée de concentration atmosphérique n'était disponible pour ces postes de travail. En tenant compte des renseignements

¹⁵ CARSAT: caisses d'assurance retraite et de la santé au travail ; CRAMIF : Caisse régionale d'assurance maladie d'Île-de-France

fournis, les experts ont estimé une durée d'exposition lors des déchargements des camions de l'ordre de 3-4 heures par an avec des expositions atmosphériques aux poussières totales qui pourraient être supérieures à 10 mg.m^{-3} (notamment lorsque l'opérateur rentre dans la case pour déplacer la sauterelle).

Travailleurs travaillant au contact de boues de STEP

Dans le cadre de cette saisine, l'Anses a organisé trois visites dans des stations d'épuration (STEP) entre novembre 2017 et janvier 2018.

Dans l'une de ces STEP, des mesures d'exposition aux bioaérosols avaient été effectuées par l'INRS en 2016, dans le cadre d'une étude nationale. Ces mesures ont révélé des concentrations ambiantes en poussières inhalables de l'ordre de 0,08 à $0,53 \text{ mg.m}^{-3}$. Ces mesures ont été effectuées à divers postes de travail du traitement des boues, dont la zone de centrifugation et des sècheurs-granulateurs. Dans ces zones, dans l'hypothèse de teneurs maximales autorisées en cadmium dans les boues de STEP à 10 mg Cd.kg^{-1} de matière sèche¹⁶ (MS), les mesures d'ambiance à poste fixe conduisent à des concentrations en cadmium qui seraient au maximum de $5,3 \cdot 10^{-3} \text{ } \mu\text{g.m}^{-3}$.

Dans la seconde STEP visitée, des mesures d'exposition atmosphérique aux poussières inhalables et au cadmium avaient été réalisées en 2007 à l'unité de séchage. Ces mesures ont mis en évidence des concentrations ambiantes de 0,53 à $5,90 \text{ mg.m}^{-3}$ de poussières inhalables alors que l'opérateur était exposé à une concentration de 20 mg.m^{-3} sur 8 heures. Des mesures de cadmium effectuées sur ces prélèvements de poussières indiquaient des concentrations variant de 0,79 à $0,93 \text{ } \mu\text{g.m}^{-3}$.

Ces résultats peu représentatifs (nombre limité de mesures) indiquent cependant qu'il existe une potentialité d'exposition au cadmium dans ce type d'unité et pour les travailleurs affectés au transport des pellets soit sur le site ou vers les sites de valorisation (épandage, valorisation énergétique). Dans cette STEP, en accord avec le médecin du travail, des analyses de cadmiurie ont été réalisées en mai 2018 sur les sept techniciens en poste au sécheur de boues. Seuls six échantillons ont pu être exploités. Les résultats des analyses ont révélé des cadmiuries comprises entre 0,12 et $0,26 \text{ } \mu\text{g.g}^{-1}$ créatinine.

Travailleurs d'entreprises spécialisées dans les travaux agricoles, en charge de l'épandage des MAFOR (boues de STEP, effluents d'élevage, etc.)

Les opérations d'épandage au champ peuvent donner lieu à une émission importante de poussières, notamment lors de l'épandage de boues séchées. Cependant, aucune mesure atmosphérique n'a été recensée.

Il est à noter toutefois que :

- le conducteur est le plus souvent isolé dans une cabine de catégorie 4 selon la norme NF EN 15695 (cabine pressurisée) ;
- les outils modernes employés diminuent les émissions d'aérosols (dispersion au ras du sol à l'aide par exemple de pendillard auto-moteur associé ou pas à un enfouisseur) ;

¹⁶ Arrêté du 08/01/98 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 08/12/97 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées

- les produits épandus contiennent le plus souvent de faibles teneurs en cadmium.

Concernant les opérations de déchargement-chargement des boues sèches, au regard de la diversité des outils potentiellement utilisés (pelle mécanique ou tracteur avec ou sans cabine), de la configuration des zones de travail (stockage en grande quantité sur un même lieu, à l'air libre, etc.), il a été estimé que ces opérations pourraient conduire à une exposition non négligeable. Toutefois, cette exposition n'a pu être quantifiée puisqu'aucune mesure n'était disponible.

Travailleurs agricoles

Aucune donnée de concentration atmosphérique au cadmium n'a été recensée dans le secteur des travailleurs agricoles.

Le CES VSR souligne toutefois que :

- les opérations relatives aux épandages des boues de STEP ou aux chargements des engrais phosphatés sont généralement effectuées par les personnels d'entreprises spécialisées en épandages (boues) et des coopératives agricoles (engrais phosphatés). Si l'approvisionnement en engrais phosphatés s'effectue *via* un *big-bag*¹⁷, une exposition de l'agriculteur aux poussières pourra avoir lieu lors de l'ouverture de celui-ci ;
- la période d'épandage des engrais phosphatés a lieu une fois par an sur une durée de quelques jours, généralement à l'automne ;
- la littérature relève une grande imprécision des connaissances sur les matières fertilisantes d'origine résiduaire MAFOR (boues, effluents, etc.) produites (nature et quantité) et sur leur valorisation par épandage, ainsi que l'hétérogénéité de la répartition de la production entre les territoires, en particulier pour les effluents d'élevage. De ce fait, il ressort qu'il n'est pas possible de déterminer un scénario d'exposition aux MFSC réaliste pour l'ensemble des travailleurs agricoles français.

Travailleurs de la filière jardinage utilisant des MFSC

Sont concernés par ce paragraphe les professionnels en contact avec des MFSC en quantité moindre (jardinerie, agents d'espace vert, etc.). En l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de se prononcer sur les expositions de ces professionnels, faute de données disponibles.

3.2.3.Q2c : 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)?

Comme indiqué précédemment et dans la mesure où le recours à la surveillance biologique des expositions est la méthode à utiliser préférentiellement pour l'évaluation des expositions au cadmium, aucune évaluation fiable et représentative de l'exposition des populations de travailleurs en contact avec des MFSC potentiellement contaminées par du cadmium n'a pu être réalisée, du

¹⁷ Un *big-bag* est un grand sac souple, permettant des livraisons en vrac de grandes quantités de matières sèches non dangereuses diverses (engrais, sable, gravats, ...).

fait de l'absence de données biométriologiques et du faible nombre de mesures disponibles, y compris en terme de niveaux d'exposition atmosphérique.

Il est également important de souligner que les estimations faites lors de ces travaux reposent largement sur l'exposition au cadmium par voie respiratoire, et qu'il est donc possible qu'elles ne reflètent pas l'exposition réelle au cadmium des professionnels en contact avec des MFSC

En ce qui concerne les valeurs de référence disponibles pouvant être utilisées en comparaison des estimations des niveaux d'exposition des professionnels, l'Anses a recommandé en 2018¹⁸ dans le cadre de ces travaux d'expertise visant à évaluer leur exposition chronique au cadmium :

- une valeur limite biologique pragmatique¹⁹ (VLB) de 5 $\mu\text{g.g}^{-1}$ de créatinine pour le cadmium urinaire ;
- des valeurs biologiques de référence de 0,8 $\mu\text{g.g}^{-1}$ de créatinine (pour les non-fumeurs) et 1,0 $\mu\text{g.g}^{-1}$ de créatinine (pour les fumeurs) correspondant au 95^{ème} percentile des valeurs retrouvées dans la population générale d'adultes de l'étude nationale nutrition santé (ENNS) (Fréry *et al.*, 2009) ;
- une VLEP-8h pragmatique¹⁵ de 3 $\mu\text{g.m}^{-3}$ (prélèvement de la fraction inhalable) pour le cadmium et ses composés en retenant comme effet critique l'atteinte de la fonction rénale.

Par ailleurs, le SCOEL²⁰ a recommandé en 2017 une VLEP-8h de 1 $\mu\text{g.m}^{-3}$ pour la fraction inhalable pour le cadmium et ses composés.

Travailleurs concernés par la production d'engrais phosphatés

En s'appuyant sur les résultats de l'extraction des données de la base COLCHIC, il est possible d'indiquer que des dépassements des VLEP recommandées par l'Anses (3 $\mu\text{g.m}^{-3}$) et le SCOEL (1 $\mu\text{g.m}^{-3}$) sont susceptibles de se produire dans ces secteurs d'activités (cf. Tableau 4 ci-dessous). En effet, l'analyse des données COLCHIC a révélé une exposition moyenne au cadmium de l'ordre de 1,1 $\mu\text{g.m}^{-3}$ avec une valeur maximale de 3,8 $\mu\text{g.m}^{-3}$.

Les postes de travail les plus exposés correspondraient aux activités de broyage des matières premières.

Travailleurs au contact de boues de STEP

Dans ce secteur d'activité, en considérant le respect des teneurs maximales autorisées en cadmium dans les boues de STEP (à savoir 10 mg Cd.kg⁻¹ de matière sèche (MS)), les mesures d'ambiance à poste fixe effectuées²¹ par l'INRS en 2016 tendent à indiquer que les concentrations en cadmium seraient de l'ordre du ng.m⁻³ d'air.

¹⁸ Anses (2018). Valeurs limites d'exposition à des agents chimiques en milieu professionnel. Evaluation des effets sur la santé et des méthodes de mesure des niveaux d'exposition sur le lieu de travail pour le cadmium et ses composés. Maisons-Alfort 134 p..

¹⁹ Compte tenu des données disponibles, il n'a pas été possible de construire de valeurs limites sur la base de la cancérogénicité du cadmium. A défaut, c'est l'effet rénal qui a été retenu pour la construction des valeurs limites pour le cadmium et ses composés.

²⁰ Scientific Committee on Occupational Exposure Limits ; il s'agit d'un comité d'experts scientifique européen en charge de la recommandation de valeurs limites d'exposition professionnelle ;

SCOEL (2017). SCOEL/OPIN/336 Opinion from the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for cadmium and its inorganic compounds. European Commission. 52p

²¹ Pour rappel, les concentrations ambiantes en poussières inhalables étaient de l'ordre de 0,08 à 0,53 mg/m³.

Cela conduit à considérer que l'exposition atmosphérique au cadmium des travailleurs de ces STEP serait faible au regard de la VLEP-8h de $3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ recommandée par l'Anses.

Cette estimation est confortée par les analyses de cadmiurie réalisées sur 7 techniciens en poste dans un sécheur de boues d'une des STEP visitées (cf. supra). En effet, pour les 6 travailleurs (fumeurs et non-fumeurs) pour lesquels les mesures de cadmiurie étaient exploitables, les résultats d'analyse ont révélé des cadmiuries comprises entre $0,12$ et $0,26 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de créatinine. Ces valeurs sont inférieures à $0,8 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ de créatinine, valeur correspondant à la valeur biologique de référence (VBR) recommandée pour les non-fumeurs et correspondant au 95^{ème} percentile des valeurs retrouvées dans la population générale d'adultes de l'étude française ENNS (Fréry et al., 2009).

Travailleurs en contact avec des MFSC pour lesquels l'Anses ne disposait pas de données de contamination atmosphérique en cadmium

Une analyse, basée sur une estimation de la fréquence d'exposition et les niveaux d'exposition atmosphérique présumés en poussières, a été réalisée en utilisant les données de la littérature pour estimer des niveaux de contamination atmosphérique au cadmium (par exemple, à partir de la concentration seuil en cadmium dans les engrais).

Sur la base de ces estimations, des dépassements de la VLEP « poussières réputées sans effet spécifique » de $10 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ pourraient être observés, notamment chez les employés de coopératives agricoles, travaillant dans les silos de stockage des engrais phosphatés ou lors des opérations de déchargement-chargement des MAFOR, ou des opérations de maintenance.

Pour les travailleurs exerçant dans les coopératives agricoles, en considérant une concentration atmosphérique en poussières inhalables de $10 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ et des concentrations en Cd variant de 60mg à $90 \text{mg}/\text{kg P}_2\text{O}_5$, les concentrations atmosphériques estimées de cadmium seraient comprises entre $0,6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ et $0,9 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (cf. tableau 4).

L'exposition durant les chargements d'épandeurs (livraison aux agriculteurs) serait du même ordre de grandeur en ce qui concerne la durée d'exposition mais avec des concentrations atmosphériques estimées plus faibles (avis d'expert considérant un espace non clos, un chargement à l'air libre, etc.).

Concernant le secteur du transport et de l'épandage des MAFOR, les opérations d'épandage au champ peuvent donner lieu à une émission de poussières, notamment lors de l'épandage de boues séchées. Pour ces opérations d'épandage, aucune donnée d'empoussièrement n'a été recensée. Cependant, en considérant que :

- le conducteur est le plus souvent isolé dans une cabine de catégorie 4 selon la norme NF EN 15695 (cabine pressurisée) ;
- les outils modernes employés diminuent les émissions d'aérosols (dispersion au ras du sol à l'aide par exemple de pendillard auto-moteur associé ou pas à un enfouisseur) ;
- les produits épandus contiennent le plus souvent de faibles teneurs en cadmium (entre $0,02$ et $50 \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de MS) (cf. chap 3 du rapport d'expertise collective - concentrations en Cd identifiées dans l'étude de Belon, 2012) ;

l'exposition par inhalation des opérateurs aux poussières-aérosols peut être considérée comme faible, et donc par conséquent, l'exposition atmosphérique au cadmium durant ces opérations peut être considérée comme négligeable au regard de la VLEP-8h pragmatique de $3 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ recommandée par l'Anses.

Concernant les opérations de déchargement-chargement des boues sèches, au regard de la diversité des outils potentiellement utilisés (pelle mécanique ou tracteur avec ou sans cabine), de la configuration des zones de travail (stockage en grande quantité sur un même lieu, à l'air libre, etc.), il a été estimé que ces opérations pourraient conduire à une exposition atmosphérique non négligeable aux poussières. Toutefois, celle-ci n'a pu être quantifiée puisqu'aucune mesure n'était disponible.

Tableau 4. Récapitulatif des estimations des concentrations atmosphériques en cadmium des travailleurs de la filière MFSC

Type de MFSC	Secteur /activité	Source	[Cd] µg/m ³	Ratio (Concentration atmosphérique mesurée ou estimée / VLEP recommandée par l'Anses ou le SCOEL)		Commentaires et observations des experts
				Anses (3 µg/m ³)	SCOEL (1 µg/m ³)	
Boues de STEP	Production des boues	Campagne de mesure de cadmiurie effectuée à l'occasion de cette expertise	Exposition professionnelle considérée comme négligeable dans la mesure où les valeurs de cadmiurie mesurées sont inférieures à la VBR recommandée par l'Anses pour les non-fumeurs de 0,8 µg.g ⁻¹ de créatinine			Les mesures de cadmiurie étant inférieures à la valeur biologique de référence (VBR) recommandée par l'Anses, l'exposition professionnelle au cadmium peut être considérée comme négligeable. Toutefois ces mesures ayant été effectuées dans une seule STEP, ces conclusions sur un nombre limité de travailleurs, ne peuvent être considérées comme représentatives de l'ensemble des STEP.
Engrais phosphatés	Chargement/déchargement	Heederick, (1994) (**)	0,02-4.8 µg/m ³	0,006 – 1,6	0,02-4,8	Les niveaux d'empoussièrement les plus élevés correspondraient aux activités de broyage des matières premières et des opérations de
	Production-Broyage	Colchic(*) (1987-2017)	Moy : 1,1 Max 3,8 µg/m ³	0,36 1,27	1.1 3.8	

Avis de l'Anses
Saisine n°2015-SA-0140

	Formulation	Campagne de mesure (*) (2018)	<0,1 µg/m ³	<0.03	<0.1	déchargement de minerais phosphatés.
	Distribution - Coopérative agricole	Jugement d'expert (***)	<1,0 µg/m ³	<0,33		La visite de sites et l'entretien avec les travailleurs laissent supposer que cette phase de travail est susceptible d'induire des expositions à des concentrations atmosphériques de poussières inhalables probablement supérieures à 10 mg/m ³
MAFOR	Epandage	Jugement d'experts (***)		Négligeable		Aucune donnée d'empoussièrement disponible
Tous types	Travailleurs agricoles	Jugement d'experts (***)		Négligeable		Aucune donnée d'empoussièrement disponible
	Professionnels du jardinage	En l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de se prononcer pour ce secteur d'activité, faute de données disponibles sur la nature des MFSC utilisés, sur les quantités et leur fréquence d'emploi, sur la nature des outils employés ainsi que sur les scénarios d'exposition.				

*Concentrations atmosphériques en Cd réellement mesurées

** Concentrations atmosphériques en Cd estimées à partir des concentrations atmosphériques en poussières inhalables

*** Basé sur des estimations grossières des concentrations atmosphériques en poussières à partir du jugement d'experts en hygiène industrielle

3.2.4. Conclusion et recommandations du CES concernant la question 2

Conclusion du CES VSR :

L'étude de filière des principales MFSC a permis d'identifier que les secteurs industriels dont les travailleurs sont susceptibles d'être exposés au cadmium sont les suivants :

- le secteur des engrais phosphatés, depuis le déchargement des roches phosphatées jusqu'à la commercialisation et la distribution des produits finis, et notamment les activités de broyage des matières premières ;
- les secteurs industriels générant et épandant des matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR) ;
- les utilisateurs de MFSC (agriculteurs, agents chargés de l'entretien des espaces verts...).

L'étude de filière a également permis de mettre en évidence les points suivants :

- l'absence de résultats de mesures biologiques pour évaluer les expositions au cadmium ;
- les expositions, qui sont essentiellement prises en compte par les entreprises lorsqu'elles réalisent leur évaluation des risques, sont celles liées aux poussières et non celles liées au cadmium ;
- un nombre limité de mesures atmosphériques (concentrations en poussières inhalables et en cadmium) ont été identifiées à partir de données de la littérature, d'extraction de la base de données COLCHIC ou de campagnes de mesures dans les secteurs de la production des engrais phosphatés et des boues de STEP. Au regard de ce faible nombre, les données recensées ne peuvent pas être considérées comme représentatives de l'exposition au cadmium des travailleurs de ces secteurs, ni de la filière MFSC ;
- concernant les professionnels des secteurs de la distribution d'engrais phosphatés, de l'épandage des MFSC, et la population des agriculteurs, aucune donnée d'exposition n'a pu être identifiée.

De ce fait, au regard de ces observations, seule une estimation grossière de l'exposition au cadmium des travailleurs de la filière MFSC, des producteurs aux utilisateurs finaux, a pu être réalisée.

Les rares données de concentration atmosphérique en cadmium ont été comparées aux VLEP préconisées récemment par l'Anses ($3 \mu\text{g.m}^{-3}$, 2018) et le SCOEL ($1 \mu\text{g.m}^{-3}$, 2017). A partir des données de la base COLCHIC, des dépassements de ces seuils ont notamment été observés pour les travailleurs issus de la filière production d'engrais phosphatés (cf. Tableau 4).

Pour les travailleurs des autres secteurs (distribution-utilisation de MFSC, épandage, agriculteurs, etc.), l'absence de données de concentration atmosphérique en poussières inhalables ne permet pas de se prononcer formellement sur l'exposition atmosphérique au cadmium de ces travailleurs. Seules des estimations, basées sur des jugements d'experts en hygiène industrielle, ont pu être faites (cf. Tableau 4).

Recommandations du CES VSR :

Concernant l'exposition au cadmium des agriculteurs, le CES propose d'inclure le cadmium dans la liste des substances à doser dans le projet de recherche « *Family Farm* » relatif à l'exposition



des agriculteurs français et leur famille aux pesticides, mis en œuvre par le ministère de l'agriculture.

Le CES VSR recommande également la mise en place d'enquêtes auprès des agriculteurs et des vendeurs de MFSC afin de recueillir des informations précises sur les quantités et la nature des MFSC épanchés. Le recueil de ces informations permettrait ainsi d'améliorer la robustesse des scénarios d'exposition.

3.3. Question 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 ?

3.3.1. Préambule

La source principale d'exposition de la population générale au cadmium, hors tabagisme, est l'alimentation (Efsa, 2009²², 2012²³). Selon la deuxième étude de l'alimentation totale (EAT2, Anses, 2011a)²⁴, un dépassement de la VTR du cadmium 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. Les aliments contribuant majoritairement à l'exposition au cadmium identifiés sont les pains et produits de panification sèche ainsi que les pommes de terre et produits apparentés (Anses, 2011a, b). Par ailleurs, en 2011, suite à l'abaissement de la VTR d'un facteur 3 par l'EFSA (2009), une révision des teneurs maximales en cadmium dans les denrées alimentaires a été initiée au niveau européen.

Dans ce cadre, l'Anses avait été saisie pour déterminer l'impact de l'abaissement des teneurs maximales dans les denrées sur les niveaux d'exposition de la population française au cadmium²⁵ (Anses, 2011b). Les simulations faites, notamment sur les principaux contributeurs à l'exposition au cadmium, ont montré un impact modéré de l'abaissement des teneurs maximales sur l'exposition du consommateur en raison du caractère ubiquitaire du cadmium et d'une réglementation en place depuis plusieurs années (Règlement (CE) n°1881/2006²⁶). Par conséquent, l'Anses recommandait, 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.

Plus récemment, les conclusions de l'étude de l'alimentation totale infantile (EATi) publiée en septembre 2016 (Anses, 2016)²⁷ confirment celles de l'EAT2, à savoir que le risque sanitaire lié au cadmium ne peut être écarté pour les enfants de moins de trois ans. Dans l'EATi, les principaux contributeurs à l'exposition au cadmium pour les enfants de plus de 5 mois sont identiques à ceux identifiés pour la population générale. L'Anses avait conclu que les recommandations émises pour réduire l'exposition alimentaire de la population générale étaient également pertinentes pour les enfants de moins de 3 ans afin de limiter l'accumulation du cadmium dès le plus jeune âge. Le renforcement de mesures de gestion visant à limiter les niveaux d'exposition au cadmium s'avèrent ainsi nécessaires.

Les matières fertilisantes (cf annexe 3) représentent une source d'apport en cadmium dans les sols agricoles, constituant un des points d'entrée du cadmium dans la chaîne alimentaire (cf

²² 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.

²³ 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.

²⁴ 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.

²⁵ ANSES (2011b). Avis de l'Anses relatif à la révision des teneurs maximales en cadmium des denrées alimentaires destinées à l'Homme.

²⁶ Règlement (CE) n°1881/2006 de la Commission du 19 décembre 2006 portant fixation de teneurs maximales pour certains contaminants dans les denrées alimentaires.

²⁷ 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.

annexe 1). 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)²⁸ ont montré que les apports en cadmium au sol en France attribuables aux matières fertilisantes sont fortement liés aux engrais minéraux phosphatés dans les départements de grandes cultures. Cela s'explique par leur concentration en cadmium et par les quantités de matières fertilisantes utilisées. Par ailleurs, les effluents d'élevage contribuent significativement aux apports au sol dans les régions d'élevage (Bretagne par exemple). Le rapport ADEME-SOGREAH (2007)²⁹ corrobore le fait que les engrais minéraux phosphatés constituent plus de la moitié des apports en cadmium au sol alors que les déjections animales en représentent 25%.

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 telles que les amendements organiques (NF U 44-051), amendements minéraux (NF U 44-001) etc. Concernant les engrais inorganiques minéraux, ils sont définis au niveau européen par le règlement (CE) n°2003/2003³⁰ mais celui-ci ne fixe pas de limite en cadmium dans les engrais porteurs du marquage 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).

Les travaux de la Commission européenne visant à réviser la réglementation relative aux matières fertilisantes ont pour objectif la fixation de nouvelles valeurs limites des contaminants dans l'ensemble des matières fertilisantes prenant en compte les effets néfastes du cadmium pour l'Homme et pour l'environnement. Il est notamment envisagé, dans le cas d'un engrais organo-minéral, une teneur en cadmium de ce fertilisant porteur du marquage CE pour une teneur en phosphore (P) en masse d'équivalent anhydride phosphorique (P₂O₅) (« engrais phosphaté ») de 60 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹, puis une réduction 3 ans après à 40 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ et finalement 12 ans après à 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹. Sont également proposées dans ce projet pour les amendements minéraux basiques et organiques porteurs du marquage CE, une valeur seuil en cadmium de 3 mg.kg⁻¹ de matière sèche (MS) et pour les amendements inorganiques une valeur seuil en cadmium de 1,5 mg.kg⁻¹ de matière sèche³¹. Lors des discussions inter-institutionnelles, le Conseil de l'Europe a proposé une teneur en cadmium de 60 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹³² dans l'engrais organo-minéral porteur du marquage CE.

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'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 (cf annexe 1).

²⁸ 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.

²⁹ ADEME/SOGREAH. (2007). Bilan des Flux de Contaminants Entrant sur les Sols Agricoles de France Métropolitaine. Rapport final, pp. 330.

³⁰ 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

³¹ 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.

³² 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

3.3.2. Méthodologie retenue pour proposer des niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles français, la contamination des productions végétales et l'exposition alimentaire

L'enjeu de la démarche est de diminuer la contamination en cadmium des sols agricoles français et des cultures, ainsi que de préserver la santé du consommateur au regard de sa consommation et de la toxicité du cadmium.

Afin de proposer des niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles français et la contamination des productions végétales, et par conséquent l'exposition alimentaire du consommateur, un modèle mathématique a été construit.

Ce choix s'est appuyé 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.

3.3.2.1. Analyse critique des travaux européens sur les valeurs limites en cadmium dans les matières fertilisantes

L'analyse des travaux européens existants (Agence suédoise des produits chimiques KEMI, 2011³³ ; Smolders et Six (Fertilizer Europe), 2013³⁴ ; SCHER, 2016³⁵) a montré que les résultats de ces travaux ne sont pas directement transposables à la situation française dans son ensemble (apport moyen des fertilisants minéraux, caractéristiques des sols (teneurs en Cd, pH...), etc.) (cf. rapport d'expertise collective de la question 3).

Toutefois, cette analyse met en avant le fait qu'une solution à privilégier est la limitation des apports en cadmium au sol par les engrais phosphatés commercialisés. Dans ces travaux, l'effet des engrais minéraux phosphatés sur l'accumulation de cadmium dans les sols agricoles a été étudié sur la base d'une approche « mass-balance » (bilan de masse), liée à la modélisation de la concentration en cadmium dans les sols sur une période de 99 ans compte tenu de la persistance du cadmium dans les sols. La qualité des engrais minéraux phosphatés peut être davantage maîtrisée que celle des effluents d'élevage plus complexes et moins renseignés, qui doivent cependant faire l'objet d'une attention soutenue.

3.3.2.2. Etat de l'art du transfert du cadmium depuis les apports dans les sols agricoles jusqu'à l'exposition du consommateur

Un état des lieux des paramètres pertinents en termes de transfert du cadmium depuis les sources environnementales d'apport dans les sols agricoles jusqu'à l'exposition du consommateur a été

³³ Kadmiumpulhalten måste minska – för folkhälsans skull En riskbedömning av kadmiumpul med mineralgödsel i fokus Rapport från ett regeringsuppdrag. 2011 ».

³⁴ Revisiting and updating the effect of phosphate fertilizers to cadmium accumulation in European agricultural soils.

³⁵ 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.

conduit en amont de la construction du modèle (cf. rapport d'expertise collective portant sur la question 3). La figure 1 permet de visualiser le transfert du cadmium le long de la chaîne alimentaire, depuis la source (matières fertilisantes) jusqu'aux cibles de la question (sol, productions agricoles, consommateurs), et d'identifier les paramètres clés liés à ce transfert. 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 ;

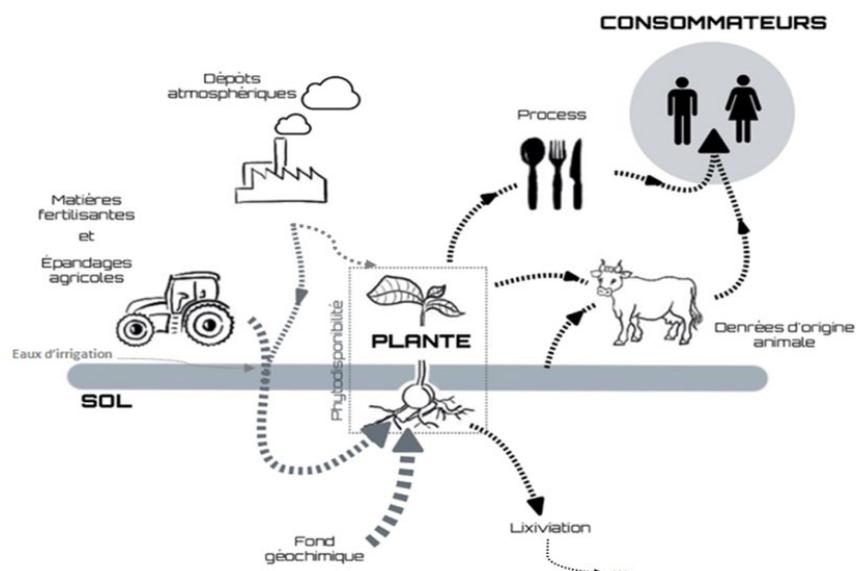


Figure 1. Schéma conceptuel du transfert du cadmium depuis les sources environnementales jusqu'au consommateur final de denrées contaminées par le cadmium

3.3.2.3. 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

Une modélisation mathématique du transfert du cadmium depuis l'apport d'une matière fertilisante dans le sol jusqu'à la plante suite à une action à la source a été construite. Elle a pris en compte l'ensemble des voies d'entrée du cadmium dans le sol (matières fertilisantes, dépôts atmosphériques, eaux d'irrigation) et voies de sortie du cadmium du sol (culture à vocation

alimentaire, lixiviation) et les variabilités le long de ce transfert (cf. figure 1). En fonction des itinéraires de fertilisation liés à l'usage des matières fertilisantes, l'évolution modélisée des niveaux de contamination en cadmium des cultures est répercutée sur l'exposition alimentaire associée pour évaluer le risque sanitaire. La valeur seuil en cadmium dans les matières fertilisantes qui sera proposée découlera des résultats issus de ce modèle (à partir de scénarios réalistes d'apport en cadmium testés pour l'évaluation des risques, liés à des scénarios représentatifs et protecteurs de la fertilisation des sols agricoles français par les matières fertilisantes). La démarche d'évaluation est schématisée sur la figure 2.

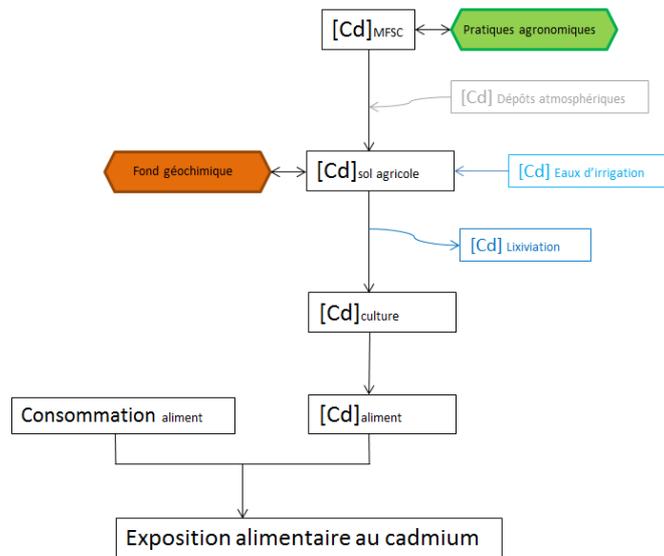


Figure 2. Schéma de modélisation du transfert du cadmium depuis l'apport en cadmium dans les sols agricoles par la matière fertilisante jusqu'au consommateur par l'intermédiaire des productions végétales

Le modèle mathématique a été élaboré en fonction de l'emploi d'une matière fertilisante de type engrais minéral phosphaté, source majoritaire identifiée d'apport en cadmium dans les sols agricoles français. Ce choix résulte aussi de la disponibilité de données maîtrisées sur les engrais phosphatés et de la possibilité de tester différents teneurs en cadmium dans l'engrais phosphaté. Puis, le modèle intégrant des données d'entrées liées à des flux entrants de cadmium a été élargi, dans un but de comparaison de flux, aux autres matières fertilisantes (effluents d'élevage, boues de STEP...). 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 modulant le transfert du cadmium depuis l'apport des matières fertilisantes ont été retenus avec en premier lieu, le pH, facteur déterminant dans la mobilité du cadmium puis des paramètres tels que 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 du sol.

La fertilisation de toutes les cultures par les engrais ne pouvant être intégralement prises en compte dans la construction du modèle, le modèle mathématique a été limité à la fertilisation phosphatée de deux cultures identifiées à l'origine des principaux aliments contributeurs à l'exposition du consommateur au cadmium (Anses, 2011a, 2011b, 2016). Ces cultures, respectivement peu et fortement exigeantes en phosphore, sont le blé et la pomme de terre. Dans le cadre des itinéraires de fertilisation phosphatée, les pratiques agricoles courantes liées aux cultures de blé et 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'apport avec un temps d'impasse de deux ans (c'est-à-dire un seul apport d'engrais minéral phosphaté réalisé au cours des trois ans).

La construction du modèle a été réalisée en deux étapes :

- 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 aux sols agricoles à la production végétale (pomme de terre et blé (grain)) a été modélisé. Cette partie du modèle a été construite sur la base d'une approche « bilan de masse » qui s'appuie sur un calcul d'équilibre entre les voies d'entrée et de sortie du cadmium dans le sol agricole, en prenant en compte :

- 1) l'ensemble des voies d'entrée du cadmium dans le sol (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).

Dans cette première étape du modèle, des concentrations modélisées en cadmium dans le sol (horizons de surface), le blé (grain), la pomme de terre et les eaux lixiviées sont générées 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 Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS, www.gissol.fr). 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 donc 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 l'eau de pluie, les rendements ou la quantité d'eau d'irrigation, varient d'une parcelle à l'autre et d'une année à l'autre. La variabilité de ces paramètres a été considérée en tirant aléatoirement une valeur différente par parcelle et par année directement dans les distributions ajustées aux données. 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.*, 2008³⁶, De Vries *et al.*, 2011³⁷ et 2013³⁸, Ran *et al.*, 2016³⁹).

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.

³⁶ 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.

³⁷ De Vries., McLaughlin., Groenenberg. (2011). Transfer functions for solide-solution partitioning of cadmium for Australian soils. *Environmental Pollution* 159 (2011) 3583-3594.

³⁸ 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.

³⁹ 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.

En raison de la difficulté d'estimer la part réelle de cadmium biodisponible relative à l'apport de matière fertilisante, la modélisation a considéré le cadmium total entièrement biodisponible (situation jugée 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.

Un tableau des paramètres d'entrée (valeurs et équations relatives au flux entrant en cadmium et flux sortant en cadmium du sol) liés au modèle probabiliste construit sur la base de l'approche « bilan de masse » et incluant l'intégration de la variabilité et le traitement de l'incertitude a été élaboré. Celui-ci est présenté dans le rapport d'expertise collective associé au traitement de la question 3 de cette saisine (cf. tableau 19).

In fine, les moyennes et percentiles des concentrations en cadmium dans le sol, la plante (blé (grain) et pomme de terre) et l'eau lixiviée sur l'ensemble des parcelles sont présentés dans des tables et sous forme de 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.

- Modélisation de l'exposition du consommateur

Dans un second temps, le transfert de cadmium de la production végétale vers le consommateur à travers les aliments a été modélisé afin d'estimer l'exposition des consommateurs. Cette seconde partie du modèle s'est appuyée sur un modèle existant mis en œuvre 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). Les simulations effectuées avec le modèle permettent d'obtenir 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. Les variations (exprimées en pourcentage moyen) de la concentration en cadmium obtenues dans les plantes en fonction des scénarios de fertilisation ont été répercutées sur la contamination moyenne en cadmium des aliments et ingrédients à base de blé et pommes de terre (Anses, 2011a). Cette approche a permis d'estimer l'impact sur l'exposition du consommateur au cadmium.

In fine, les données de sortie du modèle permettent de déduire l'exposition chronique moyenne et au 95^{ème} percentile 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.

3.3.3. 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 français et des cultures jusqu'à l'exposition du consommateur

Le modèle est dans un premier temps utilisé pour des itinéraires de fertilisation phosphatée dans le cadre d'un usage agricole en monoculture blé ou en rotation pomme de terre/blé/blé.

L'emploi des engrais phosphatés est dépendant de l'exigence en phosphore de la culture et de l'offre en phosphore du sol en France (pauvre, moyen, riche). Les itinéraires de fertilisation les plus exigeants en apport d'engrais minéraux phosphatés dans les sols agricoles et liés à des sols pauvrement pourvus en phosphore par rapport aux exigences des plantes en phosphore ont donc

été considérés. Cette situation représentant une situation maximaliste en nécessitant le plus d'apport en engrais phosphatés concerne un tiers des sols agricoles (cultures et prairies) en France (RMQS – GIS SOL). Les doses d'apport liées aux itinéraires de fertilisation considérés 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.

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, il est considéré comme hypothèse de départ le seuil réglementaire actuel normé en France 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) le long de la modélisation comme résumé dans le tableau ci-dessous. Le modèle est adapté en fonction des seuils en cadmium constants ou dégressifs dans l'engrais phosphaté apporté au sol agricole durant le temps de projection.

Tableau 5. Hypothèses de seuils de concentrations en cadmium dans les engrais phosphatés testés dans le modèle probabiliste

Concentration en cadmium 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)	Années 1 à 3	Années 4 à 15	Années 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), vingt scénarios d'itinéraires de fertilisation liés à l'usage d'engrais minéraux phosphatés sont testés.

Ces modélisations sont accompagnées de simulations permettant la comparaison des flux entrants en cadmium selon la nature de la matière fertilisante (organique/inorganique), afin de discuter de façon plus complète des phénomènes d'accumulation du cadmium dans les divers compartiments. 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. En effet, quelles que soient les matières fertilisantes utilisées, cela permet d'agir quantitativement et

temporellement sur les apports en élément au regard de la gestion durable des flux d'apport en cadmium vers les sols agricoles et les cultures.

Les vingt scénarios d'itinéraires de fertilisation liés à l'usage d'engrais phosphatés correspondent à des flux entrants en cadmium estimés entre 0,67 et 9,00 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹ suivant le scénario.

Les flux de cadmium apportés au sol par les engrais minéraux phosphatés ont été comparés avec ceux liés aux fertilisants d'origine organique. Parmi les matières fertilisantes, les amendements calcaïques et magnésiens ne sont pas pris en compte dans le modèle en raison de leur très faible contribution en cadmium. Des flux d'apport en cadmium dans les sols agricoles pour des fertilisants d'origine organique pour lesquels des données sont disponibles ont été dérivés.

Il a été simulé dans le modèle les flux d'apports en cadmium relatifs aux :

- digestats de méthanisation avec un flux annuel dérivé de 1,75 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹ sur la base de la concentration moyenne en cadmium identifiée dans le fertilisant et de 7,50 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹ en considérant le seuil réglementaire en cadmium dans les digestats⁴⁰ ;
- fumiers bovins avec un flux annuel dérivé de 2,55 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹ ;
- boues de STEP avec un flux annuel dérivé de 4,80 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹.

Les flux d'apport en cadmium pour les fertilisants d'origine organique ont été dérivés en considérant la teneur moyenne en cadmium identifiée dans ces fertilisants (Plateau (2001)⁴¹, Chambre d'agriculture Bretagne *et al.* (2007)⁴², Irstea et SOLAGRO (2012)⁴³, Benoît *et al.* (2014)⁴⁴, Wolf environnement (2001)⁴⁵), à l'exception de l'utilisation du seuil réglementaire pour les digestats de méthanisation. Les quantités épandues de fertilisants d'origine organique considérées dans le modèle correspondent aux pratiques possibles.

Pour les effluents d'élevage et les digestats issus de méthanisation à la ferme, ces quantités ont été calculées sur la base d'un apport d'azote correspondant au seuil maximal de la directive nitrate⁴⁶ 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. Le seuil maximal d'apport autorisé par la réglementation a été sélectionné comme point de départ (3 tonnes MS.ha⁻¹.an⁻¹)⁴⁷.

Par conséquent, le modèle mathématique construit est adapté pour toutes les simulations en permettant de faire varier les flux entrants en cadmium en fonction des pratiques agronomiques et du temps de projection.

⁴⁰ 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

⁴¹ 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.

⁴² 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).

⁴³ Irstea, SOLAGRO. (2012). Etat de l'art des digestats et leurs 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/>.

⁴⁴ 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.

⁴⁵ 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.

⁴⁶ 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).

⁴⁷ 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

3.3.4. Résultats

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 pertinence prédictive du modèle a été évaluée au regard des concentrations modélisées en cadmium dans le sol, le blé, la pomme de terre et le lixiviat. Le modèle élaboré constitue un support prédictif cohérent pour estimer 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.

Les résultats des simulations, testées dans le modèle dans un premier temps avec des itinéraires de fertilisations liés à l'emploi d'engrais minéraux phosphatés avec différentes teneurs en cadmium dans le produit (au regard des matrices sol-plante (grain de blé, pomme de terre)-lixiviation), montrent, sur la durée de simulation (projection de 0 jusqu'à 99 ans) 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 dès une teneur en cadmium de 40 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ dans les engrais phosphatés (selon quelques itinéraires de fertilisation, 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 est nettement plus marquée pour une teneur en cadmium de 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹ 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.kg P₂O₅⁻¹), 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.

Lors de l'analyse des bilans de masse entre les compartiments à l'issue des simulations, il apparaît que le cadmium est davantage transféré vers l'eau lixiviée que vers les matrices sol et culture. Si l'étude de l'évolution du cadmium lixivié en fonction des itinéraires de fertilisation dépasse le contexte strict de la saisine, le CES ERCA note que ces transferts vers les eaux souterraines et superficielles contribuent à la contamination de l'environnement et qu'il convient de les 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.

Une réduction au fil du temps du transfert du cadmium vers la plante et l'eau lixiviée avec des sols à terme plus faiblement contaminés est constatée avec les scénarios réalistes testés dans le modèle lié à l'emploi de seuils dégressifs en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés. Ces scénarios visent en quinze ans une réduction de la concentration en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés à 20 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹.

Au regard de la sécurité sanitaire du consommateur, bien qu'un dépassement de la VTR orale du cadmium chez l'adulte et l'enfant dérivée dans cette saisine (0,35 µg Cd.kg p.c⁻¹.j⁻¹) 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 que si aucune action n'est entreprise pour réduire la teneur en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés (maintien du seuil réglementaire actuel normé en France dans les engrais phosphatés de 90 mg Cd.kg P₂O₅⁻¹), l'impact négatif sera conséquent pour le consommateur, avec une augmentation significative du pourcentage de dépassement de la VTR observée chez les adultes comme chez les enfants. En effet, dans cette

situation (maintien du seuil réglementaire actuel normé en France dans les engrais phosphatés de $90 \text{ mg Cd.kg P}_2\text{O}_5^{-1}$), 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.

Avec des itinéraires de fertilisation liés à une teneur en cadmium de $20 \text{ mg Cd.kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans les engrais minéraux phosphatés (scénarios de fertilisations à seuils en cadmium constants ou dégressifs au fur et à mesure du temps), avec une projection à 99 ans, une réduction significative du pourcentage de la population dépassant la VTR est observée (cf. tableaux 23 et 24 et figures 25, 26, 27, 28 du rapport d'expertise collective de la question 3).

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. En revanche, 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...) (cf annexe 1 et 2).

Les résultats des modélisations des transferts du cadmium, liés à l'emploi d'engrais minéraux phosphatés ont été comparés avec ceux des modélisations liées à des flux entrants sur les sols avec des fertilisants d'origine organique. De cette comparaison, il ressort que les apports de cadmium aux sols par 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. A partir des données d'entrées en flux des fertilisants d'origine organique et des engrais minéraux phosphatés, sur la base d'un itinéraire monoculture blé, une diminution de l'accumulation du cadmium dans le sol et de son transfert vers le grain de blé est observée à la suite d'un flux annuel testé compris entre $0,67$ et $1,75 \text{ g Cd.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$. Ces flux sont représentatifs des scénarios utilisant les digestats de méthanisation à la ferme avec une concentration moyenne en cadmium de $0,7 \text{ mg.kg}^{-1} \text{ MS}$ et avec les fertilisants phosphatés présentant une teneur en cadmium de $20 \text{ mg Cd.kg P}_2\text{O}_5^{-1}$. A partir d'un flux de $2,55 \text{ g Cd.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$, une accumulation du cadmium dans les sols et un transfert du cadmium vers la culture sont observés.

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, quels que soient la nature du fertilisant et les itinéraires de fertilisations testés, un flux d'apport en cadmium, inférieur à $2 \text{ g Cd.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ permet une diminution de l'accumulation du cadmium dans le sol agricole et son transfert dans l'environnement.

L'influence des caractéristiques des sols agricoles sur le transfert du cadmium a été étudiée. A 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 $\text{pH} > 7,5$, ainsi qu'un risque de transfert du cadmium vers les cultures en présence de sols acides ($\text{pH} < 6,5$) sont observés. A l'exception des engrais minéraux phosphatés présentant une teneur égale ou inférieure à $40 \text{ mg Cd.kg P}_2\text{O}_5^{-1}$, il semble 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.

Suite à une réduction des teneurs en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés, l'effet sur la biodisponibilité du cadmium se distingue nettement sur les sols acides dans lesquels une diminution significative du transfert du cadmium est observée. Par conséquent, le CES ERCA note l'intérêt de réduire les concentrations en cadmium dans les engrais minéraux phosphatés vis-à-vis, notamment, des sols acides qui favorisent la solubilité du cadmium. Il est noté la possibilité d'immobiliser le cadmium dans le sol par l'augmentation du pH de ces sols acides par chaulage ou par l'ajout d'amendements basiques au sol. 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, cela entraîne *in fine*, une accumulation de cadmium dans les sols.

Or, ces techniques ne constituent 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, aussi intéressantes qu'elles puissent être à court terme, représentent un danger à moyen et long termes, 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 le pH, ce qui à terme peut favoriser les transferts du sol vers les cultures et les eaux de lixiviation.

3.3.5. Conclusions et recommandations du CES concernant la question 3

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, le CES ERCA recommande 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.

Le CES ERCA recommande également 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 phyto-stabilisation, 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, elles ne garantissent pas que cette adsorption perdure à moyen et long termes, 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. Le CES ERCA recommande le développement de la recherche afin d'optimiser et de développer ces procédés. Il est également fait le constat 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.

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, 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.

4. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS DE L'AGENCE

Le cadmium est un élément trace métallique ubiquitaire, présent dans différents compartiments de l'environnement, du fait de sa présence à l'état naturel dans la croûte terrestre et des apports anthropiques liés aux activités industrielles et agricoles. Ses caractéristiques font qu'il entre facilement dans la chaîne alimentaire via les végétaux qui l'absorbent par leurs racines. La toxicité du cadmium métal est avérée (classé cancérogène pour l'homme (groupe 1) par le CIRC en 2012 ; classé cancérogène de catégorie 1B et toxique pour la reproduction de catégorie 2 selon le règlement européen CLP).

Ces caractéristiques combinées de danger et d'exposition soutiennent l'importance de travaux d'expertise sanitaire sur l'exposition à cette substance. L'avis de l'agence à l'issue de ses travaux sur l'alimentation totale infantile (Anses, 2016) avait d'ailleurs recommandé la réduction de l'exposition, en agissant en particulier sur le niveau des contaminations environnementales et tout particulièrement sur les intrants (engrais minéraux, fertilisants et amendements organiques, ...).

Dans le cadre du présent avis, l'expertise menée au regard de risques sanitaires associés au cadmium conduite dans différents domaines (toxicité pour la population générale, exposition professionnelle, cycle environnemental global) apporte des éléments d'appui à la gestion et à la décision par les pouvoirs publics.

Sans qu'elle ne s'appuie sur une évaluation quantitative des risques sanitaires, l'expertise menée relative à l'exposition humaine au cadmium a permis :

- i. d'actualiser l'état des connaissances sur les effets toxicologiques du cadmium sur la santé humaine et de proposer une nouvelle valeur toxicologique de référence (VTR) par ingestion ;
- ii. d'étudier la filière professionnelle des matières fertilisantes et les sources d'exposition en cadmium associées ;
- iii. d'analyser sur la base d'un modèle mathématique « de la fourche à la fourchette », l'évolution des niveaux de contamination en cadmium depuis l'apport de matières fertilisantes dans les sols jusqu'à l'aliment consommé. Cette analyse a déterminé des niveaux en cadmium permettant de maîtriser et réduire la pollution des sols agricoles,

la contamination des productions végétales et l'exposition au cadmium du consommateur par voie alimentaire et également l'exposition des professionnels de façon indirecte.

Ces trois axes (élaboration d'une VTR, connaissance de la filière MFSC et niveaux de contamination en cadmium dans les matières fertilisantes) interagissant entre eux, permettent de mieux appréhender l'exposition humaine au cadmium (cf Annexe 1, figure 3).

4.1. Conclusions de l'Anses

L'Anses endosse les conclusions des CES VSR et ERCA et rappelle les conclusions suivantes :

- Propositions de VTR par ingestion et de valeurs sanitaires repères dans les milieux biologiques :
 - i. L'effet critique du cadmium sur la santé, retenu par les experts sur la base des études épidémiologiques d'Engström et coll. (2011 et 2012), cible les effets osseux (notamment la déminéralisation osseuse) ;
 - ii. La concentration en cadmium urinaire ou cadmiurie de $0,5 \mu\text{g.g}^{-1}$ de créatinine a été retenue comme concentration critique dans les milieux biologiques chez un adulte de 60 ans, en supposant que l'ingestion soit la seule source d'exposition au cadmium (exposition par le tabagisme exclu) ;
 - iii. Considérant une cadmiurie de $0,5 \mu\text{g.g}^{-1}$ de créatinine, et après une modélisation toxico-cinétique (modèle PBPK), la VTR dérivée pour le cadmium est une Dose Journalière Tolérable de $0,35 \mu\text{g Cd.kg pc}^{-1}.\text{j}^{-1}$ (équivalent à une Dose Hebdomadaire Tolérable (DHT) de $2,45 \mu\text{g Cd.kg pc}^{-1}.\text{sem}^{-1}$).
- Evaluation des expositions professionnelles au cadmium dans la filière MFSC :
 - iv. Peu de données de surveillance biologique ou d'exposition par inhalation au cadmium des travailleurs pour la filière des MFSC sont disponibles ;
 - v. L'étude de filière a mis en évidence, sur la base de données très parcellaires, des dépassements des VLEP recommandées par l'Anses ($3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ou par le SCOEL ($1 \mu\text{g}/\text{m}^3$), notamment pour les travailleurs issus de la filière production d'engrais phosphatés ;
 - vi. En dehors de deux secteurs ciblés où quelques rares données sont disponibles, l'absence de mesures biologiques de travailleurs ne permet pas d'évaluer rigoureusement les expositions professionnelles au cadmium.
- En ce qui concerne la question relative à la proposition de niveaux en cadmium dans les matières fertilisantes permettant de maîtriser la pollution des sols agricoles et la contamination des productions végétales :
 - vii. Un flux annuel d'apport en cadmium *via* les matières fertilisantes n'excédant pas $2 \text{g Cd.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$ quelles que soient la nature (engrais/amendement, origine organique/minérale...) et la quantité totale de matière(s) fertilisante(s) apportée(s) au sol agricole est le niveau limite recommandé, qui permettrait de maîtriser la pollution des sols agricoles, la contamination des productions agricoles et par conséquent diminuer l'exposition alimentaire associée ;
 - viii. Au regard des itinéraires de fertilisations testés, une teneur en cadmium égale ou inférieure à $20 \text{mg Cd.kg P}_2\text{O}_5^{-1}$ dans les produits de type engrais minéraux

phosphatés pouvant être régulés à la source permet de ne pas dépasser ce flux annuel de 2 g Cd.ha⁻¹.an⁻¹.

4.2. Recommandations de l'Anses

L'Anses endosse les recommandations des CES VSR et ERCA et souligne en particulier les points suivants :

Au regard des expositions professionnelles

Compte tenu de la faiblesse des données disponibles permettant d'évaluer les expositions professionnelles au cadmium des travailleurs en contact avec des matières fertilisantes en contenant, l'Anses rappelle aux employeurs leurs obligations de santé et sécurité envers leurs salarié(e)s, sur le fondement de l'article L4121-1 et suivants du code du travail. À ce titre, ils doivent en premier lieu évaluer les risques qui ne peuvent être évités afin de pouvoir mettre en œuvre des actions de prévention des risques professionnels, des actions d'information et de formation et assurer la mise en place d'une organisation et de moyens adaptés. A cet égard, l'Anses souligne l'importance de la recommandation relative à l'information claire sur le contenu en cadmium des matières fertilisantes (quelle que soit leur provenance). Par ailleurs, dans la mesure où ces travaux ont pu mettre en évidence l'existence de postes de travail probablement exposants au cadmium, l'Anses recommande que les expositions au cadmium via l'utilisation de matières fertilisantes soient évaluées dans le cadre de la prévention primaire. A cette fin, elle rappelle que la biométrie est la méthode à utiliser préférentiellement pour pouvoir évaluer les expositions au cadmium qui est un toxique dont la toxicité est liée à la dose cumulée dans le temps.

Au regard de l'évolution, sur le long terme, des expositions de la population par voie alimentaire

Compte tenu du caractère ubiquitaire du cadmium, et de la nécessité d'une action de réduction de l'exposition sur le long terme à cet élément par la voie alimentaire, l'analyse du cycle de contamination (cf figure 3, annexe 1) a mis en évidence :

- l'importance de la maîtrise des entrées en cadmium dans ce cycle (quelques soient les types d'apports) ;
- l'intérêt que peuvent représenter les réductions des flux d'apport en cadmium par les matières fertilisantes dans les boucles du cycle.

A cet égard, l'Anses souligne la valeur établie par les experts d'un flux annuel limite de 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) qui permet d'enclencher un cycle de décroissance dans l'exposition par voie alimentaire.

Ce seuil peut être atteint, dans l'hypothèse du seul apport par des engrais minéraux phosphatés, par une valeur maximale de 20 mg Cd.kg⁻¹ P₂O₅. L'Anses prend acte du compromis intervenu au niveau européen le 18 novembre dernier, fixant une première valeur limite en cadmium des

engrais minéraux phosphatés à $60 \text{ mg Cd.kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ et constate que ce compromis ne favorise pas un renversement rapide de la tendance.

Par ailleurs, l'Anses souligne que l'usage de fertilisants d'origine organique présentant une teneur en cadmium inférieure à 1 mg Cd.kg^{-1} de matière sèche, est une autre voie d'atteinte à terme de la décroissance de la contamination dans les produits alimentaires.

Aussi, compte tenu de l'efficacité temporaire des techniques de piégeage (chaulage, phytostabilisation, ...), elle soutient particulièrement les recommandations des experts qui ont trait aux trois voies d'évolution que constituent :

- la poursuite de la baisse de la valeur limite en dessous des $60 \text{ mg Cd.kg}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$ pour les engrais minéraux phosphatés et le développement de techniques de décadmiation relatives à leur production ;
- la décroissance du cycle de contamination lié à l'apport de tous autres types d'intrants ;
- la disponibilité de l'information sur les teneurs en cadmium de produits mis en œuvre ;

La mise en œuvre, par les leviers d'action appropriés, de ces recommandations permettra à terme de passer sous le seuil des $2 \text{ g Cd.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$, indispensable pour enrayer une évolution à la hausse du pourcentage de la population (adultes et enfants), dont l'exposition dépasse la valeur toxicologique de référence au cadmium par la seule voie alimentaire.

Dr Roger Genet

MOTS-CLES

Cadmium, toxicité, valeur toxicologique de référence, valeur sanitaire repère, matière fertilisante, contamination des sols et des cultures, exposition alimentaire

ANNEXES

Annexe 1 : Schéma conceptuel de la saisine

L'expertise scientifique doit permettre 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 ;
- (iii) De recommander *in fine* 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 3).

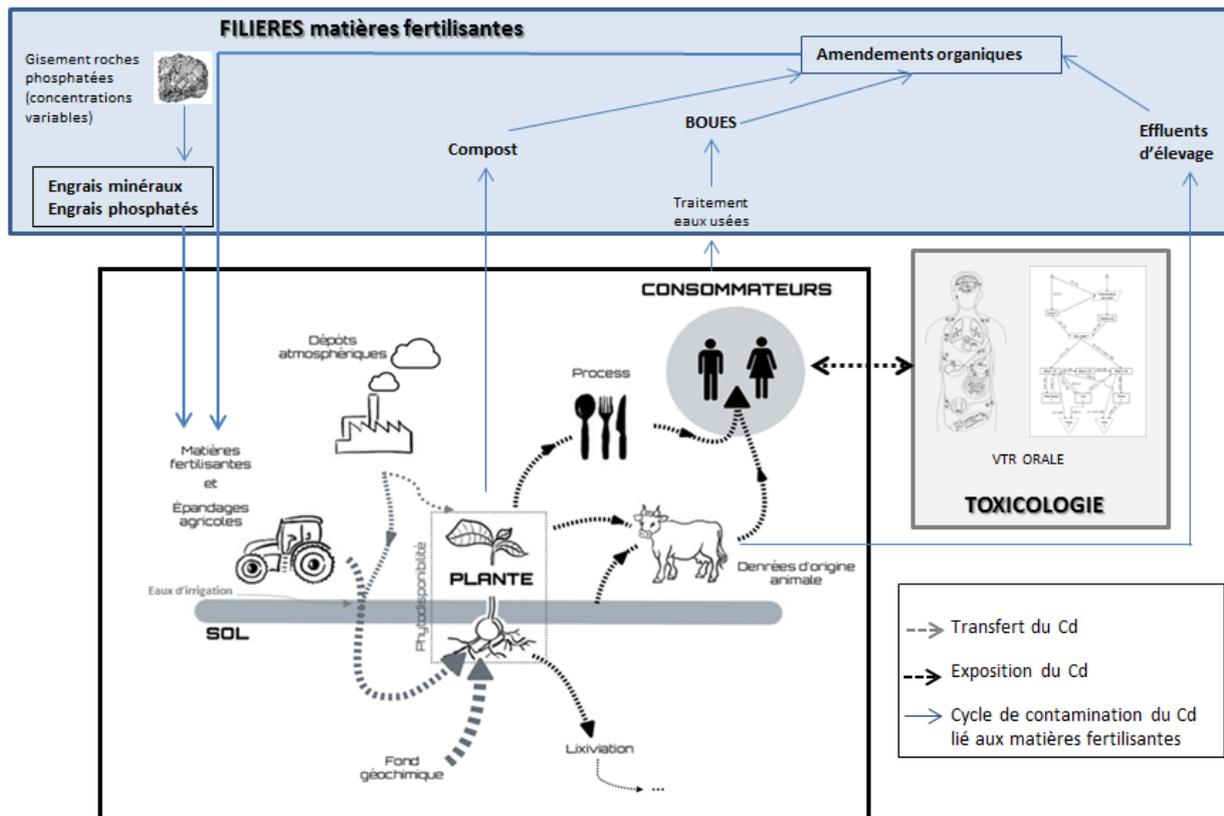


Figure 3 : Exposition humaine au cadmium - Depuis ses sources dans l'environnement, dont la filière des matières fertilisantes, jusqu'à l'exposition du consommateur

Annexe 2 : Valeurs repères biologiques du cadmium médiane (en µg/g de créatinine en fonction de l'âge)

Age (année)	Cd urinaire en µg/g de créatinine	Poids estimé (kg)	Age (année)	Cd urinaire en µg/g de créatinine	Poids estimé (kg)
0	0,00	4	33	0,20	72
1	0,02	8	34	0,21	72
2	0,03	12	35	0,22	72
3	0,04	16	36	0,23	73
4	0,04	20	37	0,25	73
5	0,05	24	38	0,26	73
6	0,05	27	39	0,28	73
7	0,06	31	40	0,29	73
8	0,06	34	41	0,31	73
9	0,06	37	42	0,32	73
10	0,06	40	43	0,34	72
11	0,07	42	44	0,36	72
12	0,07	45	45	0,37	72
13	0,07	47	46	0,39	72
14	0,08	50	47	0,40	72
15	0,08	52	48	0,42	71
16	0,08	54	49	0,43	71
17	0,09	56	50	0,44	71
18	0,09	58	51	0,46	71
19	0,10	59	52	0,47	70
20	0,10	61	53	0,47	70
21	0,11	62	54	0,48	70
22	0,11	64	55	0,48	70
23	0,12	65	56	0,49	69
24	0,12	66	57	0,49	69
25	0,13	67	58	0,49	69
26	0,13	68	59	0,49	69
27	0,14	69	60	0,49	69
28	0,15	69	61	0,49	69
29	0,16	70	62	0,49	69
30	0,16	71	63	0,50	69
31	0,17	71	64	0,50	69
32	0,19	71	65	0,51	69

Annexe 3 : récapitulatif des diverses typologies de MFSC.

La définition des matières fertilisantes et supports de cultures (MFSC) est donnée par l'article L255-1 du Code Rural.

Les matières fertilisantes prises en compte dans les travaux d'expertise comprennent à la fois les engrais (organiques, inorganiques, organo-minéraux) destinés à assurer ou à améliorer la nutrition des végétaux et les amendements (organiques, inorganiques, organo-minéraux) permettant d'améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.

Les MFSC représentent une vaste catégorie. Ils ont une composition très hétérogène allant d'une composition bien définie comme les produits type engrais synthétiques à des mélanges très variés tels que les boues de stations d'épuration (STEP) susceptibles de contenir de nombreux contaminants.

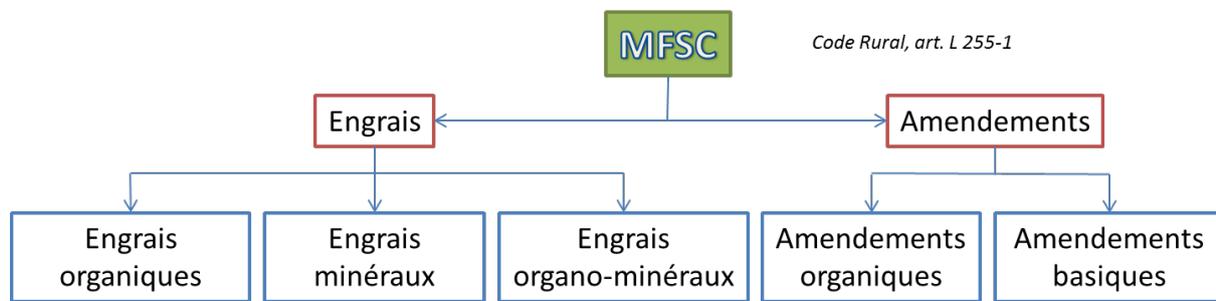


Figure 4 : Les diverses typologies de MFSC

Les engrais destinés à apporter aux plantes des éléments directement utiles à leur nutrition.

Il peut s'agir d'éléments fertilisants majeurs ou secondaires ou encore d'oligo-éléments.

Ces éléments fertilisants sont ainsi classés en trois groupes par ordre d'importance pour les plantes :

- o Les éléments majeurs : azote, phosphore et potassium ;
- o Les éléments mineurs ou secondaires : calcium, magnésium, soufre et sodium ;
- o Les oligo-éléments : requis en très faible quantité mais néanmoins indispensables aux plantes (fer, manganèse, chlore, cuivre, zinc...).

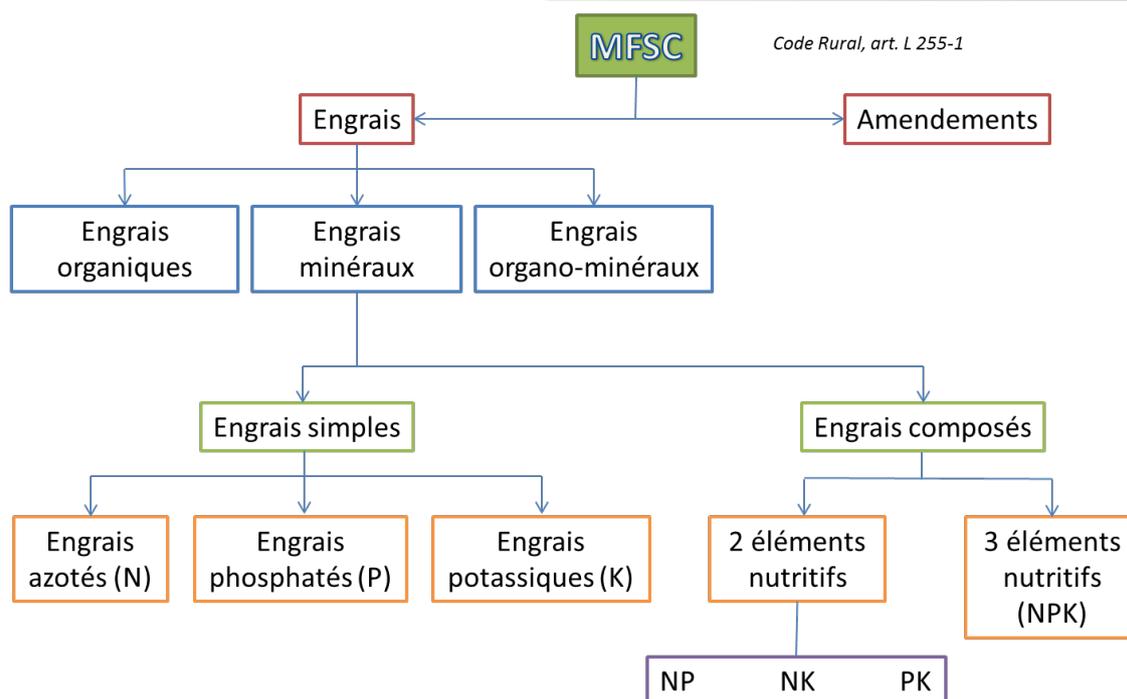


Figure 5 : Positionnement des engrais phosphatés susceptibles d'être contaminés par du cadmium

Les engrais représentent tous les produits dont une des teneurs en éléments majeurs dépasse 3%. Ils sont eux même subdivisés en trois classes :

- o Les engrais organiques, qui sont soit d'origine animale, soit d'origine végétale. Ils peuvent être également synthétisés ;
- o Les engrais minéraux, dont les éléments nutritifs déclarés sont sous forme de sels minéraux, obtenus par extraction et/ou par des procédés industriels physiques et/ou chimiques ;
- o Les engrais organo-minéraux, dont les éléments nutritifs déclarés, d'origine à la fois organique et minérale, sont obtenus par mélange et/ou combinaison chimique d'engrais ou produits organiques et minéraux.

Parmi les engrais minéraux, les fertilisants minéraux azotés et potassiques présentent des teneurs très faibles en éléments traces métalliques (ETM) (et donc en cadmium) (Ademe, 2007c). De ce fait, ils ne seront pas considérés dans la suite des travaux.

Concernant les fertilisants minéraux phosphatés, le phosphate de calcium naturel sert de matière première de base pour la fabrication des engrais phosphatés. Les gisements naturels sont situés principalement au Maroc, aux USA, en Russie et au Moyen Orient. Tous ces gisements sont plus ou moins riches en phosphates et sont composés naturellement d'autres éléments chimiques. De ce fait, la concentration en éléments traces métalliques (donc en cadmium) des roches phosphatées varie potentiellement selon les gisements. Ainsi, selon l'origine de la matière première et du cahier des charges du produit fini (composition/formulation), certains fertilisants minéraux phosphatés peuvent aussi contenir des taux relativement élevés de cadmium d'origine naturelle.

En France, pour les fertilisants minéraux phosphatés commercialisés, pour les engrais contenant plus de 5% de P_2O_5 , le seuil maximum autorisé de Cd/kg établi par la norme française NF U 42-001-1 de 2011 (AFNOR, 2011) est actuellement de $90 \text{ mg Cd.kg } P_2O_5^{-1}$.

Les amendements destinés à modifier ou à améliorer les propriétés physiques, chimiques ou biologiques des sols.

Les amendements, contrairement aux engrais, ont pour rôle de modifier la structure et l'acidité des sols, même si parfois ils constituent aussi un apport non négligeable d'éléments nutritifs. Il est distingué :

o Les amendements organiques : composés principalement de combinaisons carbonées d'origine végétale, fermentées ou fermentescibles, ils sont destinés à l'entretien ou à la reconstitution du stock de matière organique du sol. Les teneurs en azote, phosphore et potassium des produits bruts ne doivent pas dépasser chacune 3% et leur somme doit être inférieure à 7%, sinon l'amendement devient alors un engrais. Les matières fertilisantes d'origine résiduaire (MAFOR) font partie de cette famille.

o Les amendements basiques, appelés aussi amendements calciques ou amendements minéraux : contenant du calcium ou du magnésium, généralement sous forme d'oxydes, d'hydroxydes ou de carbonates mais qui sont sans matière organique et sans teneur déclarable en azote, phosphore, potassium et oligo-éléments. Ces amendements sont destinés principalement à maintenir ou à élever le pH du sol.

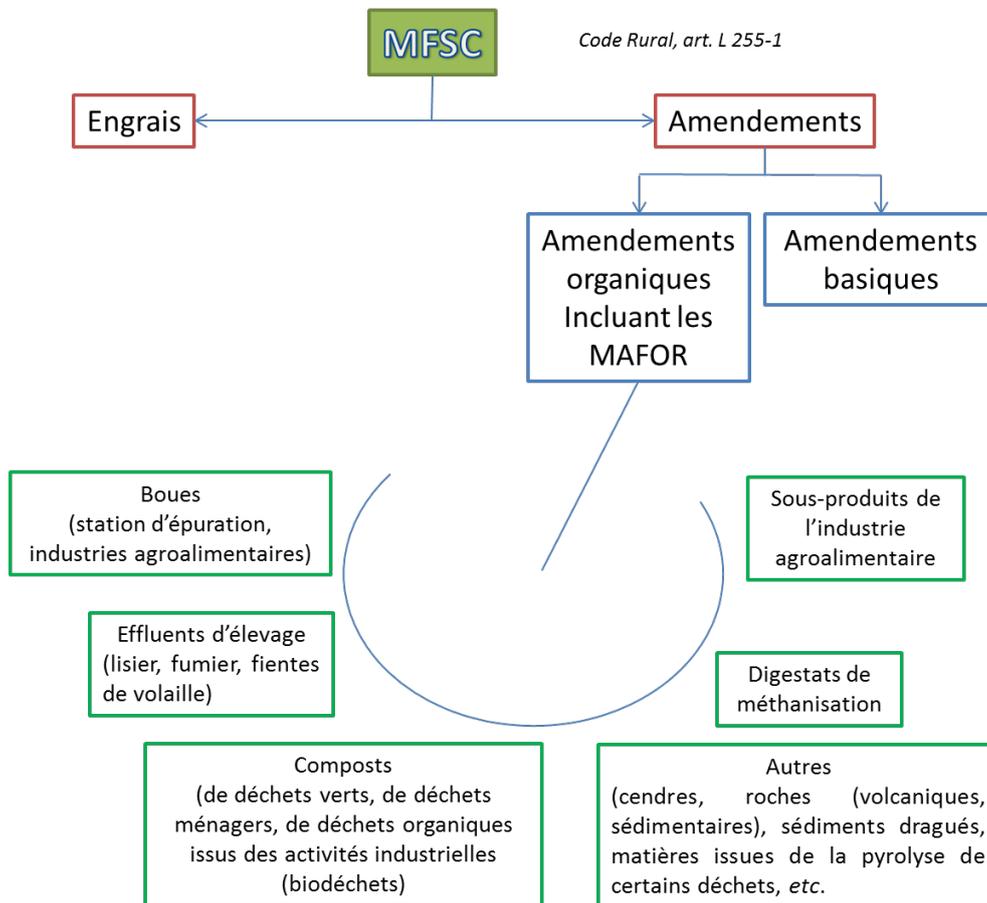


Figure 6 : Classification des amendements et description des MAFOR