SERVICE PUBLIC DE WALLONIE
DIRECTION GENERALE OPERATIONNELLE DE L'AGRICULTURE, DES RESSOURCES NATURELLES ET DE L'ENVIRONNEMENT
Département des Sols et des Déchets
Direction de la Protection des Sols

Convention d'appui scientifique et technique

CONTASOL

Evaluation des flux d'éléments contaminants liés aux matières fertilisantes épandues sur les sols agricoles en Wallonie

G. Piazzalunga, V. Planchon, R. Oger

En collaboration avec
P. Luxen, B. Godden (Agra-Ost)

31/08/2012

Rapport final

Centre wallon de Recherches agronomiques
Département Agriculture et Milieu naturel
Unité Systèmes agraires, Territoire et Technologies de l'information
Bâtiment L. Lacroix - Rue de Liroux, 9 – B-5030 GEMBLOUX
Tél : ++ 32 (0)81 62 65 74 - Fax : ++ 32 (0)81 62 65 59
agrimil@cra.wallonie.be - http://www.cra.wallonie.be

Centre wallon de Recherches agronomiques

Wallonie

REMERCIEMENTS ..... **I**

RESUME ..... **II**

SUMMARY ..... **III**

INTRODUCTION ..... **V**

CHAPITRE 1. LES SOURCES D'ÉLÉMENTS DE CONTAMINATION DANS LES MATIÈRES FERTILISANTES UTILISÉES EN WALLONIE **1**

PARTIE 1. MATIÈRES FERTILISANTES MINÉRALES ET ENGRAIS DE FERME **3**

1. INTRODUCTION **3**

1.1. OBJECTIFS 3
1.2. DEFINITIONS 3
1.3. TEXTES DE LOI NATIONAUX ET REGIONAUX 6

2. MATIÈRES FERTILISANTES MINÉRALES **7**

2.1. INTRODUCTION 7
2.2. ENGRAIS AZOTES 7
2.3. ENGRAIS PHOSPHATES 10
2.4. ENGRAIS POTASSIQUES 15
2.5. ENGRAIS COMPOSES 18
2.6. ENGRAIS CALCAIRES 19
2.7. CONCLUSIONS POUR LES MATIERES FERTILISANTES MINERALES 20

3. ENGRAIS DE FERME **21**

3.1. INTRODUCTION 21
3.2. ALIMENTS POUR ANIMAUX 21
3.3. MEDICAMENTS 30
3.4. LITIERES DE PAILLE DE CEREALES 34
3.5. ENGRAIS DE FERME (OU EFFLUENTS D'ELEVAGE) 35
3.6. CONCLUSION POUR LES ENGRAIS DE FERME 45

4. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES **47**

4.1. DOCUMENTS 47
4.2. COMMUNICATIONS PERSONNELLES 51
4.3. SITES WEB 51

PARTIE 2. PROPOSITION DE NOTE DE BASE POUR L'ÉTUDE DE LA PROBLÉMATIQUE DES GERMES PATHOGÈNES **52**

1. INTRODUCTION **52**

1.1. DEFINITIONS 52
1.2. CADRE LEGAL 53

2. BACTÉRIES **54**

2.1. ENGRAIS DE FERME 54
2.2. BOUES 56
2.3. DIGESTATS 57

2.4. COMPOSTS 58

3. VIRUS 59

3.1. ENGRAIS DE FERME 59
3.2. BOUES 60
3.3. DIGESTATS 60
3.4. COMPOSTS 60

4. PARASITES 61

4.1. ENGRAIS DE FERME 61
4.2. BOUES 62
4.3. DIGESTATS 62
4.4. COMPOSTS 62

5. SURVIE DANS LES SOLS 63

5.1. FACTEURS AFFECTANT LA SURVIE DES MICRO-ORGANISMES PATHOGENES DANS LES SOLS 63
5.2. BACTERIES 64
5.3. VIRUS 65
5.4. PARASITES 66

6. CONCLUSIONS 68

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 69

CHAPITRE 2. ESTIMATION DES FLUX DE MATIÈRES FERTILISANTES ÉPANDUES SUR LES TERRES AGRICOLES EN RÉGION WALLONNE 71

1. PRÉAMBULE 73

2. ENGRAIS MINÉRAUX 73

2.1. INTRODUCTION 73
2.2. TYPES D'ENGRAIS MINERAUX COMMERCIALISES EN BELGIQUE ET EN REGION WALLONNE 74
2.3. ESTIMATION DES QUANTITES D'ENGRAIS MINERAUX UTILISEES EN REGION WALLONNE 85

3. ENGRAIS DE FERME 90

3.1. INTRODUCTION 90
3.2. TYPES D'ENGRAIS DE FERME PRODUITS EN REGION WALLONNE 90
3.3. ESTIMATION DES QUANTITES D'ENGRAIS DE FERME PRODUITES EN REGION WALLONNE 91

4. CONCLUSIONS 99

5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 100

5.1. DOCUMENTS 100
5.2. COMMUNICATIONS PERSONNELLES 100
5.3. SITES WEB 101

CHAPITRE 3. TENEURS MOYENNES D'ETM ET DE CTO DANS LES MATIÈRES FERTILISANTES UTILISÉES EN RÉGION WALLONNE **103**

1. RAPPEL DES CONTAMINANTS IDENTIFIÉS DANS LES MATIÈRES FERTILISANTES **105**

2. PLAN D'ÉCHANTILLONNAGE **105**

2.1. ENGRAIS MINERAUX 105
2.2. ENGRAIS DE FERME 107

3. PRÉLÈVEMENT DES ÉCHANTILLONS ET ANALYSES **108**

3.1. ENGRAIS MINERAUX 108
3.2. ENGRAIS DE FERME 111

4. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS **113**

4.1. ENGRAIS MINERAUX 113
4.2. ENGRAIS DE FERME 140
4.3. MATIERES EXOGENES 145
4.4. TENEURS EN ETM PAR UNITES D'AZOTE 148

5. CONCLUSIONS **151**

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES **152**

6.1. DOCUMENTS 152
6.2. COMMUNICATIONS PERSONNELLES 152

CHAPITRE 4. FLUX POTENTIELS DE CONTAMINANTS ETM EN RÉGION WALLONNE ET REPRÉSENTATIONS SPATIALES **153**

1. PRÉAMBULE **155**

2. INTRODUCTION **155**

3. MÉTHODES DE CALCUL **155**

3.1. ENGRAIS MINERAUX 155
3.2. ENGRAIS DE FERME 156
3.3. MATIERES EXOGENES 156

4. FLUX PAR TYPE DE MATIÈRE **157**

4.1. PROPORTION DES DIFFERENTES MATIERES DANS LES FLUX TOTAUX 157
4.2. FLUX ISSUS DES ENGRAIS MINERAUX 158
4.3. FLUX ISSUS DES ENGRAIS DE FERME 158
4.4. FLUX ISSUS DES MATIERES EXOGENES 159
4.5. COMPARAISON PAR RAPPORT AUX NORMES EXISTANTES ET A LA TENEUR DU SOL 160

5. FLUX D'ETM ARRIVANT SUR LES SOLS AGRICOLES EN RÉGION WALLONNE **160**

5.1. ARSENIC 160
5.2. CADMIUM 161
5.3. CHROME 162
5.4. CUIVRE 162
5.5. MERCURE 163
5.6. NICKEL 163

5.7. PLOMB 164
5.8. ZINC 164
6. CONCLUSIONS 165
7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 165

CHAPITRE 5. PLAN DE SURVEILLANCE DES RISQUES DE CONTAMINATION DES SOLS PAR LES ETM ET LES CTO PRÉSENTS DANS LES MATIÈRES FERTILISANTES 167

1. PRÉAMBULE 169
2. INTRODUCTION 169
3. ANALYSE DES RISQUES RELATIFS 170
3.1. CLASSEMENT DES MATIERES A RISQUE 170
3.2. ANALYSE DES CONTAMINANTS 173
4. STRUCTURATION D'UN PLAN DE SURVEILLANCE 181
4.1. MATIERES ET CONTAMINANTS A SURVEILLER 181
4.2. MATIERES ET CONTAMINANTS POTENTIELS A DETECTER ET A SURVEILLER 183
4.3. AMELIORATIONS DES ESTIMATIONS 183
5. CONCLUSIONS 187
6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 188
6.1. DOCUMENTS 188
6.2. SITES WEB 188

DELIVRABLES PRODUITS DANS LE CADRE DU PROJET CONTASOL 189

REMERCIEMENTS

Le projet CONTASOL a pu être mené à bien grâce à l'intervention de différentes personnes travaillant dans des sociétés actives dans le domaine des engrais ainsi qu'au niveau de différentes directions du Service Public de Wallonie et du Centre wallon de Recherches agronomiques.

Pour les sociétés actives dans le domaine des engrais, nous pensons en particulier à Benoît Otjaques et Hervé Demasy de la Société Coopérative Agricole de la Meuse (SCAM) pour nous avoir fait part de leurs estimations générales sur les parts de ventes entre les différents engrais minéraux et l'échantillonnage de ceux-ci ; Olivier Roiseux, Bernard Dambly, Claire Prophyre et Bertrand Vancutsem de la Société Wal.Agri qui nous ont transmis des données sur les parts de vente des différents engrais minéraux de la société et participé à l'échantillonnage des engrais minéraux ; Pierre-Yves Piret des Sociétés Coopératives Agricoles Réunies des régions herbagères (SCAR) pour la transmission de données sur leurs achats en engrais minéraux ; Michel Bulteel de la société LHOIST qui nous a fait part de ses estimations générales sur les quantités de matières calcaires employées en agriculture en Wallonie ; Paul Van Der Broeck et Jean-Christophe Dricot de la société PROMAGRO pour l'échantillonnage de l'Haspagit.

Nous remercions Jean-Marie Parmentier de la société ROSIER pour nous avoir conseillé et transmis différentes informations sur les quantités d'engrais employées au niveau belge. Nous remercions également Peter Jaeken de BelFertil qui nous a précisé des informations sur les quantités d'engrais minéraux employées en Belgique.

Merci aux différents membres du SPW pour nous avoir transmis diverses données sur l'agriculture wallonne. Nous pensons en particulier à Olivier Cappellen et Jean-Marie Marsin de la Direction de l'Analyse Economique Agricole ; à Pierre Lepoint, François Ghysel, Pascal Petit et Jacques Defoux de la Direction de la Protection de Sols pour leurs conseils avisés et la transmission de diverses données.

Nous remercions Thibaut Cugnon de l'asbl Réquasud ainsi que Jean-Pol Sacré et Richard Lambert du Centre de Michamps pour la recherche des laboratoires d'analyse ainsi que tous les conseils en ce qui concerne l'échantillonnage des engrais. Anne Galloy de l'ISSeP a également contribué à la recherche difficile de laboratoires d'analyses pour les CTO et en particulier les antibiotiques.

Enfin, n'oublions pas les membres du personnel du Centre wallon de Recherches agronomiques qui ont contribué directement et indirectement à la mise en place des différentes parties du projet et au bon déroulement de celui-ci. En particulier, merci à Jean-Pierre Destain, Didier Stilmant, Sylvain Hennart, Nicolas Crasset, Luc Couvreur, Henri Michels, Benoit Scaut, Marie-France Heinen, Véronique Dethier, Morgan Abras et Elise Montfort.

RESUME

La Direction de la Protection des Sols du Département du Sol et des Déchets de la DGARNE a souhaité financer pour compte de la Région, la réalisation du projet CONTASOL dans le but d'inscrire dans le développement durable l'utilisation des matières fertilisantes destinées à être épandues dans le cadre d'activités agricoles, de garantir le caractère multifonctionnel de l'agriculture et d'étudier les modalités réglementaires aux fins de protéger le sol et de prévenir les processus de contamination diffuse.

Les résultats de ce projet sont de nature à faciliter la mise en place d'un observatoire pour assurer un suivi des risques liés à la présence de substances contaminantes dans les matières fertilisantes. Les résultats du projet permettent en outre de fournir des données sur les flux d'éléments contaminants liés aux matières fertilisantes épandues sur les sols agricoles en Région wallonne.

La mission qui a été confiée au Département Agriculture et Milieu naturel du Centre wallon de Recherches agronomiques portent sur les points suivants :

- la réalisation d'un inventaire des sources potentielles de contamination des sols agricoles par les composés traces organiques (CTO) et les éléments traces métalliques (ETM) présents dans les différents types de matières fertilisantes utilisées en Région wallonne ;
- la réalisation d'une évaluation quantitative des différents éléments de contamination présents dans les matières fertilisantes utilisées en Région wallonne ;
- l'évaluation des flux potentiels de ces éléments à l'échelle des régions agricoles, des bassins versants ou des communes de la Région wallonne ;
- la hiérarchisation des sources de contamination afin de permettre d'apporter des éléments d'aide à la décision pour orienter des politiques publiques dans le domaine de la gestion des sols agricoles et pour assurer un suivi analytique des matières fertilisantes, initier de nouveaux travaux de recherche et mener des actions de sensibilisation auprès des agriculteurs ;
- la définition de la structure d'une base de données permettant le calcul des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles wallons, l'intégration des données et la construction de requêtes pour le calcul des flux aux différentes échelles spatiales qui seront utilisées ;
- une mise à disposition de couches cartographiques sur les différentes pressions de pollution des sols agricoles en Région wallonne par les substances contaminantes contenues dans les matières fertilisantes.

La méthodologie développée dans le cadre de cette convention a consisté, entre autre, en l'identification des matières fertilisantes les plus employées en Région wallonne dans le but de déterminer sur quelles matières focaliser la recherche de contaminants potentiels. La détermination des contaminants potentiels a permis, après l'échantillonnage des matières fertilisantes ciblées, de réaliser des analyses pour le dosage des teneurs en ETM et CTO. Ces analyses représentent des références régionales en termes de contamination des matières fertilisantes par les ETM et les CTO (HAP et PCB uniquement dans le cadre de ce projet).

La récolte de bases de données provenant de diverses sources et le croisement de celles-ci par l'utilisation du logiciel Access ont permis de réaliser des estimations sur les quantités d'engrais minéraux, engrais de ferme et matières exogènes appliquées sur les sols agricoles des différentes communes wallonnes.

Les flux en ETM entrants sur les sols agricoles wallons résultent du croisement des quantités de matières fertilisantes appliquées et des teneurs en ETM issues des analyses. Ces flux entrants ont été relativisés, pour chaque commune wallonne, avec les teneurs du sol.

Même si les flux calculés pour lesquels une norme existe (86/278/CEE) sont inférieurs aux valeurs de cette norme, certains flux sont plus importants que d'autres. Il a pu être démontré que, sur une période de 100 ans, les flux relatifs correspondant au Cd, Cu, Ni et Zn apportent de manière respective, au maximum 162, 95, 29 et 45 % des quantités de Cd, Cu, Ni et Zn présentes actuellement dans le sol. Ces flux étant principalement liés aux engrais de ferme, mis à part pour le Cd, qui est principalement lié aux applications d'engrais minéraux phosphatés.

Les principales matières fertilisantes à surveiller sont donc les engrais de ferme (lisiers de bovin et fumiers de bovin viandeux essentiellement) pour leurs apports en Cu, Ni et Zn et les engrais phosphatés (DAP, phosphate naturel semi-attaqué, engrais composés phosphatés) pour leurs apports en Cd.

La réalisation de ce projet a aussi permis de mettre en évidence un certain nombre de manquement pour l'évaluation des flux de contaminants. Les antibiotiques sont par exemple des substances très peu analysées dans les engrais de ferme. Il serait donc intéressant de développer des techniques d'analyse standardisées pour celles-ci.

Les recommandations pour la réalisation d'un plan de surveillance sont détaillées dans le chapitre 5 du présent rapport.

SUMMARY

The Soils Protection Directorate of the Walloon Soils and Wastes Department has founded the CONTASOL project to identify potential contamination risks of Walloon agricultural soils by fertilizers.

The methodology consisted in identifying the most used fertilizers in the Walloon region in order to determine on which materials to focus for searching potential contaminants. After identifying potential contaminants on a literature basis, a survey was conducted to collect samples in order to realize analyses for determining the concentration level of targeted metallic trace elements (MTE) and organic trace compounds (OTC). These analyses represent regional benchmarks in terms of contamination of fertilizers by MTE and OTC (PAHs and PCBs only in our case).

By using various sources of data (fertilizers producers, distributers, farmers), the project has estimated the quantities of mineral fertilizers, and organic fertilizers applied to agricultural soils in the different Walloon municipalities.

The quantities of fertilizers applied to agricultural soils were converted to MTE fluxes using the analytical results of the different materials. These fluxes have been compared to the MTE soil contents and to Walloon and European standards.

Even if estimated MTE fluxes are below the existing standards (86/278/EEC), some of them are more important than others. Indeed, in actual conditions, inputs of fertilizers, on a secular basis, can lead to a maximum increase of, respectively, 162, 95, 29 and 45 % of the actual concentration of the Walloon soils in Cd, Cu, Ni and Zn. Mineral fertilizers containing phosphate are the main source of MTE and particularly of Cd.

The main fertilizers on which to focus the monitoring are organic manures (liquid and solid manure of meaty cattle) for their contribution to the increase of the concentration in Cu, Ni and Zn in soils and phosphate fertilizers (DAP, phosphate rock and phosphate compound fertilizers) for their contributions in the Cd contamination. This project also contributed identifying the complementary information needed for accurately quantify MTE or OTC fluxes. Moreover, antibiotics are OTC for

which very little information is now available. In the future, interesting investigations should be focused on that topic.

INTRODUCTION

Dans le cadre de l'inscription dans le développement durable de l'utilisation des matières fertilisantes destinées à être épandues sur les sols agricoles et de l'étude des modalités réglementaires aux fins de protéger les sols et de prévenir les processus de contamination diffuse, le SPW, et plus particulièrement la Direction de la Protection des Sols du Département du Sol et des Déchets de la DGARNE, a confié au CRA-W une mission relative à :

- La réalisation d'un inventaire des sources potentielles de contamination des sols agricoles par les éléments traces métalliques (ETM) et les composés traces organiques (CTO) présents dans les différents types de matières fertilisantes utilisées en Région wallonne (chapitre 1).
- La réalisation d'une évaluation quantitative des différents éléments de contamination présents dans les matières fertilisantes utilisées en Région wallonne (chapitre 2).
- L'évaluation des flux potentiels de ces éléments à l'échelle des régions agricoles, des bassins versants ou des communes de la Région wallonne (chapitres 3 et 4).
- Une mise à disposition de couches cartographiques sur les différentes pressions de pollution des sols agricoles en Région wallonne par les substances contaminantes contenues dans les matières fertilisantes et ce, dans un format compatible avec les standards en vigueur à l'administration wallonne (chapitre 4).
- La hiérarchisation des sources de contamination afin de permettre d'apporter des éléments d'aide à la décision pour orienter des politiques publiques dans le domaine de la gestion des sols agricoles et pour assurer un suivi analytique des matières fertilisantes, initier de nouveaux travaux de recherche et mener des actions de sensibilisation auprès des agriculteurs (chapitre 5).
- La définition de la structure d'une base de données permettant le calcul des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles wallons, l'intégration des données et la construction de requêtes pour le calcul des flux à différentes échelles.

Le présent document constitue la synthèse des différents délivrables produits dans le cadre du projet CONTASOL.

Les résultats présentés ne constituent qu'un instantané d'un moment donné par rapport aux matières fertilisantes qui sont les plus couramment produites et utilisées dans les exploitations agricoles wallonnes. Les résultats sont sujets à un certain nombre d'incertitudes liées aux données qui ont pu être recueillies et estimées.

Le projet CONTASOL a été réalisé en partenariat avec l'asbl Agra-Ost et l'asbl Réquasud.

CHAPITRE 1.
LES SOURCES D'ÉLÉMENTS DE CONTAMINATION DANS LES MATIÈRES FERTILISANTES UTILISÉES EN WALLONIE

PARTIE 1. MATIÈRES FERTILISANTES MINÉRALES ET ENGRAIS DE FERME

1. INTRODUCTION

1.1. Objectifs

De nombreuses études ont montré que les contaminations diffuses d'éléments traces métalliques (ETM) dans les sols agricoles étaient principalement liées aux apports par voie aérienne (rejets industriels, transports) et aux épandages agricoles (pesticides, engrais, matières amendantes, engrais de ferme). Les données de base nécessaires à l'estimation des flux entrant sur les sols agricoles du fait de l'épandage d'engrais minéraux ou organiques, bien qu'elles aient fait l'objet de nombreuses études, n'ont jamais été véritablement adaptées au contexte wallon. L'objectif de ce chapitre est de réaliser un inventaire aussi complet que possible des connaissances et des données existantes sur les sources potentielles de contamination des sols agricoles par les éléments traces métalliques et les composés traces organiques (CTO) présents dans les différents types de matières fertilisantes utilisées en Wallonie. Une attention particulière sera portée aux engrais de ferme qui peuvent contenir de nombreux contaminants ayant des impacts négatifs sur l'environnement, qu'il s'agisse des ETM, des CTO, des résidus pharmaceutiques (antibiotiques, antiparasitaires, etc.) ou encore des organismes pathogènes. Cette analyse doit constituer un des éléments de base pour la définition du protocole d'échantillonnage pour la caractérisation des matières fertilisantes en usage en Wallonie et l'élaboration du plan de surveillance.

Avant de passer en revue l'ensemble des informations disponibles dans la littérature scientifique sur ce sujet, il est utile de rappeler un certain nombre de définitions et de circonscrire les limites de l'étude. Les substances fertilisantes utilisées sur un territoire même réduit comme la Wallonie sont nombreuses et présentent une diversité de formes et d'origines. Cette situation ne permet pas d'avoir une approche exhaustive. Aussi cette revue bibliographique portera sur les engrais minéraux les plus commercialisés et les engrais organiques issus des spéculations animales dominantes au sein de la région.

1.2. Définitions

1.2.1. Les matières fertilisantes

Les matières fertilisantes sont définies par l'IFA (2011) comme un matériau solide, liquide ou gazeux qui contient un ou plusieurs nutriments plus ou moins rapidement disponibles pour la plante et agissant essentiellement sur la fertilité du sol.

Le Règlement 2003/2003/CE du 13 octobre 2003 relatif aux engrais définit le terme «engrais» comme une matière ayant pour fonction principale d'apporter des substances nutritives aux plantes (Anonyme, 2003b).

Ce règlement fait mention des :

- «engrais fluides» : engrais en suspension ou en solution ;
- «engrais en suspension» : engrais à deux phases dans lequel les particules solides sont maintenues en suspension dans la phase liquide ;
- «engrais en solution» : engrais fluides qui ne contiennent pas de particules solides.

Un « fertilisant » est défini, par l'arrêté du Gouvernement wallon du 3 mars 2005 relatif au Livre II du Code de l'environnement, contenant le Code de l'eau, comme toute substance contenant un ou des composés azotés et destinée à la fertilisation des végétaux ; les fertilisants sont subdivisés en fertilisants organiques et en fertilisants minéraux (Anonyme, 2005).

a. Matières fertilisantes minérales

Le Règlement 2003/2003/CE définit le terme «engrais inorganique» comme un engrais dont les éléments fertilisants déclarés se trouvent sous la forme de minéraux obtenus par extraction ou par des procédés industriels physiques et/ou chimiques. La cyanamide calcique, l'urée et ses produits de condensation et d'association, ainsi que les engrais contenant des oligo-éléments chélatés ou complexés, peuvent, par convention, être classés dans la catégorie des engrais inorganiques.

L'arrêté du Gouvernement wallon du 3 mars 2005 définit « fertilisant minéral » comme tout fertilisant n'étant pas un fertilisant organique ; l'urée est assimilée à un fertilisant minéral.

Matières fertilisantes minérales simples

L'IFA (2011) définit les matières fertilisantes minérales simples comme des engrais minéraux contenant un seul élément fertilisant reconnu par la législation, le plus souvent N, P ou K.

Le Règlement 2003/2003/CE définit le terme «engrais simple» comme un engrais azoté, phosphaté ou potassique ayant une teneur déclarable en un seul des éléments fertilisants majeurs.

Matières fertilisantes minérales composées

Les engrais sont dits composés lorsqu'ils contiennent plus d'un élément nutritif (Destain, 2011). L'IFA (2011) définit les matières fertilisantes minérales composées comme des engrais minéraux contenant 2 ou 3 éléments fertilisants majeurs, obtenus par mélange, par voie chimique ou les deux à la fois. Les engrais composés sont désignés par une formule de 2 ou 3 nombres représentant la composition centésimale en éléments fertilisants respectivement N, P, K. Un engrais 13-13-21 contient 13 % N, 13 % P_2O_5 et 21 % K_2O (Anonyme, 2005; Destain, 2011).

Ils sont obtenus de diverses manières :

- réactions chimiques entre constituants (on utilise dans ce cas le terme d'engrais complexe) ;
- mélange physique après mouture ;
- mélange mécanique d'engrais simples ou complexes (bulk) ;
- dissolution et suspension dans l'eau.

Le Règlement 2003/2003/CE définit le terme «engrais composé» comme un engrais ayant une teneur déclarable d'au moins deux des éléments fertilisants majeurs et obtenu par réaction chimique ou par mélange ou par une combinaison des deux.

Les «engrais complexes» sont des engrais composés, obtenus par réaction chimique, par solution ou, à l'état solide, par granulation, ayant une teneur déclarable en au moins deux des éléments fertilisants majeurs. Dans son état solide, chaque granulé contient tous les éléments fertilisants dans leur composition déclarée. Les «engrais de mélange» sont des engrais obtenus par mélange à sec de différents engrais, sans aucune réaction chimique.

Amendements

Un amendement est une matière fertilisante apportant au sol des produits neutralisants, généralement de la chaux ou du carbonate de Ca (calcaires, écumes de sucrerie, etc.). L'amendement calcique agit principalement sur les composantes physiques (structure) et chimiques (pH, teneur en Ca) de la fertilité du sol (IFA, 2011).

Les amendements sont des substances minérales ou organiques qui sont employées pour entretenir ou améliorer les propriétés physiques, chimiques et l'activité biologique des sols.

b. Matières fertilisantes organiques

Le terme « fertilisant organique » est défini comme tout fertilisant obtenu à partir de matière organique, à l'exception des résidus culturaux laissés en place après récolte. Les fertilisants organiques sont divisés en deux classes :

- les « fertilisants organiques à action rapide » : fertilisants organiques caractérisés par une proportion élevée d'azote disponible rapidement après épandage ; il s'agit notamment des lisiers, des purins, des effluents de volailles et des jus d'écoulement ;
- les « fertilisants organiques à action lente » : fertilisants organiques caractérisés par une faible proportion d'azote disponible au moment de l'épandage ; il s'agit notamment des fumiers de bovins et de porcs, ainsi que des composts de fumiers.

Les produits non classés dans ces deux groupes sont catégorisés au cas par cas par l'administration de l'agriculture (AGW 3/03/2005).

Matières fertilisantes organiques endogènes

Les matières fertilisantes organiques endogènes sont les engrais d'origine agricole ou recyclés directement. Ces engrais correspondent aux effluents d'élevage (ou engrais de ferme) ; constitués de déjections solides et/ou liquides, parfois de paille ou substrat végétal et éventuellement d'eau (Destain, 2011).

Matières fertilisantes organiques exogènes

Les matières fertilisantes organiques exogènes peuvent être d'origine :

- agricole comme les écumes et les vinasses de sucreries, les résidus de substrats de fermentation ;
- urbaine comme les boues de stations d'épuration, le compost ;
- industrielle comme les boues d'industries agroalimentaires (Destain, 2011).

1.2.2. Les contaminants

a. Pollution et contamination

La Directive 2000/60/CE définit le terme pollution comme « l'introduction directe ou indirecte, par suite de l'activité humaine, de substances dans l'air, l'eau ou le sol, susceptibles de porter atteinte à la santé humaine ou à la qualité des écosystèmes aquatiques ou des écosystèmes terrestres, qui entraînent des détériorations aux biens matériels ou une entrave à l'agrément de l'environnement ou à d'autres utilisations légitimes de ce dernier » (Anonyme, 2000).

La contamination inclut la présence d'un contaminant en principe d'origine exogène au milieu. La distinction entre pollution et contamination relève d'une différence quant au dommage occasionné sur la santé humaine et l'environnement. Ainsi, on parle de contamination si le contaminant, d'origine exogène, n'occasionne pas de dommage et on parle de pollution s'il occasionne un dommage sur la santé humaine et l'environnement (Dautrebande et Sohier, 2006).

b. Eléments traces métalliques

La notion d'élément traces métalliques (ETM, anciennement métaux lourds), est actuellement relativement floue, sans définition scientifique, technique ou juridique unanimement reconnue.

Selon une étude sur les contaminations diffuses des sols par les ETM (Pereira et Sonnet, 2007), la famille des ETM comprend notamment l'As, Cd, Co, Cu, Cr, Hg, Mn, Ni, Pb et Zn ; avec Se, B, Mo, V souvent pris en compte aussi.

Baize (2002) définit les éléments traces (ET) comme les 68 éléments chimiques, constituants de la croûte terrestre, dont la concentration est inférieure à 0,1 %. Les 12 éléments majeurs (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg, Ti, H, P, Mn) représentent 99,4 % de l'ensemble et les ET représentent 0,6 %. Certains ET sont des métaux (ETM) comme, par exemple, le Cd, Cr, Zn, Pb et Cu, d'autres sont des non-métaux comme l'As, Se et B. Certains ET sont indispensables aux processus biologiques et sont appelés « oligoéléments » comme le Zn, Cu, Cr, Mo, B, d'autres n'ont pas de rôle indispensable démontré (Cd, Pb, Hg, Sn).

Tous les ETM sont potentiellement polluants. Cela dépend de leur concentration dans le milieu considéré (sol, air, eau, sédiments) mais surtout de leur forme chimique (spéciation) (Baize et Tercé, 2002).

Etant donné la confusion qui existe au niveau de l'appellation ETM, nous avons choisi de considérer comme ETM les éléments traces métalloïdes tels que l'As et le Se mais pas les éléments majeurs parfois repris comme ETM dans la littérature comme le Mn et le Ti.

c. Composés traces organiques

Les composés traces organiques (CTO) sont des composés chimiques moléculaires issus de substances chimiques principales ou de la dégradation de ces substances, et présents en quantité infinitésimale dans un milieu. Ils rassemblent de nombreuses familles de molécules chimiques (différentes familles d'hydrocarbures, pesticides organochlorés, autres substances pesticides, composés aromatiques aminés, nitrés ou nitrosés, etc.) (ADEME, 2007).

On distingue en général plusieurs grandes familles de CTO : les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les polychlorobiphényles (PCB), les polychlorodibenzo-dioxines et furannes (PCDD et PCDF), phtalates (DEHP, etc.). La plupart de ces substances sont apportées sur les terrains agricoles par différentes voies : les dépôts atmosphériques, la circulation routière, les engrais de ferme, les matières organiques exogènes et les pesticides. La pollution atmosphérique est souvent prépondérante, particulièrement aux abords des villes et des zones industrielles.

1.3. Textes de loi nationaux et régionaux

En Belgique, aucun texte de loi ne règlemente les teneurs maximales en contaminants dans les matières fertilisantes (Lambert, 2011).

En ce qui concerne les engrais, l'arrêté royal du 7/01/1998 relatif au commerce des engrais, des amendements du sol et des substrats de culture, modifié par les Arrêtés royaux (A.R.) des 18/05/1998 et 28/05/2003 n'impose pas de limitation en ce qui concerne les contaminants pouvant se retrouver dans ceux-ci.

L'article 8, 4° de cet arrêté stipule « les produits visés par le présent arrêté doivent être exempts de substances toxiques ou nocives, d'insectes nuisibles, de nématodes, de spores viables de charbon, de caries ou d'autres germes phytopathogènes de manière à ce qu'ils ne puissent avoir une influence défavorable ni sur les cultures, ni sur la santé des hommes et des animaux, lorsque ces produits sont utilisés à des doses normales et de façon judicieuse ». Des limitations sont présentées dans cet arrêté royal uniquement pour les amendements organiques du sol et les substrats de culture au niveau de l'annexe 1 (Tableau 1).

Tableau 1. Limitation des teneurs en métaux lourds pour les amendements organiques mélangés[1] (Annexe 1 de l'A.R. du 7/01/1998).

ETM	Teneur maximale (mg/kg MS)
Cd	2,5
Cr	100
Co	10
Cu	250
Hg	2,5
Pb	500
Ni	50
Zn	750

Pour les teneurs maximales en ETM dans les boues d'épuration, l'arrêté renvoie à la législation de la Région wallonne (A.G.W. 12/01/1995).

2. MATIÈRES FERTILISANTES MINÉRALES

2.1. Introduction

Les fertilisants minéraux sont des sources de contamination diffuse des sols agricoles (Mortvedt, 1996; Nziguheba et Smolders, 2008).

Le Cd, Cr et Ni sont ajoutés aux sols par l'intermédiaire des fertilisants minéraux et les amendements. Les engrais minéraux sont également une source majeure de Cu, Pb, Zn (Adriano *et al.*, 2004).

En ce qui concerne les ETM dans les engrais minéraux en tant que tels, leur teneur est faible (ADEME, 2007).

La présence d'ETM dans les engrais minéraux est principalement due aux engrais phosphatés contenant des impuretés présentes de façon naturelle dans les matières premières. Ces métaux proviennent de la roche phosphatée (Mortvedt and Giordano, 1977; Kpomblekou and Tabatabai, 1994 in (Anonyme, 1999a)).

2.2. Engrais azotés

2.2.1. Procédé de fabrication

La source majeure de toute l'industrie de l'azote, provient de la fixation de l'azote atmosphérique (Foth, 1990). Environ 77 % de la production mondiale d'ammoniac est basée sur l'utilisation de gaz naturel en utilisant le procédé Haber-Bosch (Anonyme, 2008).

La synthèse de l'ammoniac via le procédé Haber-Bosch est faite sous haute pression (200 – 400 atm), haute température (400 - 650°C) et en présence d'un catalyseur (Anonyme, 2008).

Généralement, l'hydrogène utilisé provient du gaz naturel (CH_4) et la réaction complète utilise 8 N_2 et 2 O_2 (composition de l'air).

$$7\ CH_4 + 10\ H_2O + 8\ N_2 + 2\ O_2 = 16\ NH_3 + 7\ CO_2$$

Le NH_3 synthétisé est l'ammoniac, communément appelé ammoniac anhydre. La concentration en azote y est de 82 %. Cela fait de l'ammoniac la plus concentrée des matières azotées (Foth, 1990).

[1] Un amendement organique mélangé est obtenu par le mélange de deux ou plusieurs produits prévus au chapitre III de l'annexe 1 de l'A.R. du 7/01/1998 (fumiers séchés, pulpes de raisins séchées, algues organiques séchées, etc.).

A partir du NH_3 synthétisé, il est possible de fabriquer divers autres engrais azotés (Figure 1). L'oxydation du NH_3 en acide nitrique (HNO_3) et la neutralisation de ce dernier par du NH_3 produit le nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) (Foth, 1990). Cet engrais peut servir de matière première pour la fabrication d'engrais minéraux composés (UNIFA, 2011).

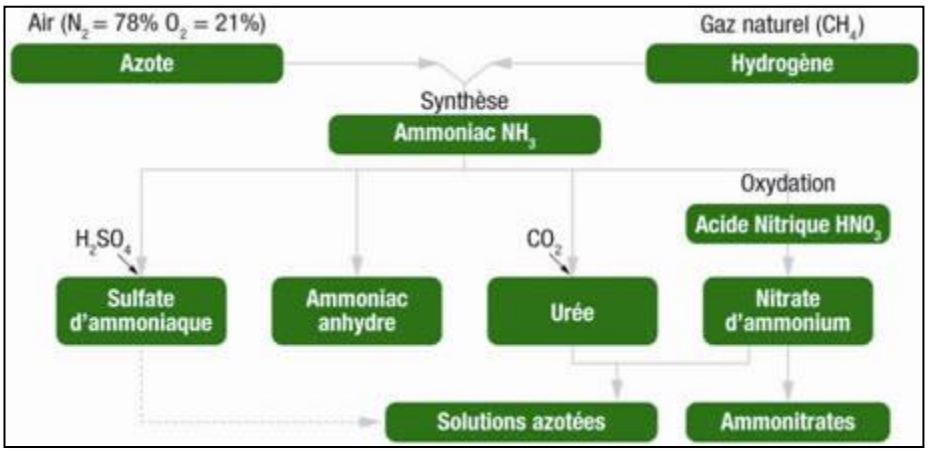

Figure 1. Schéma de fabrication des engrais azotés (UNIFA, 2011).

Le CO_2 produit lors de la réaction de synthèse (Haber-Bosch) peut être utilisé pour produire de l'urée ($CO(NH_2)_2$).

La réaction du NH_3 avec :

- de l'acide sulfurique donne du sulfate d'ammonium ($NH_3(SO_4)$) ;
- de l'acide phosphorique donne du phosphate d'ammonium ($NH_3(PO_4)$) (engrais composé, non repris dans la Figure 1).

La solution azotée contient 50 % d'urée et 50 % de nitrate d'ammonium et dose communément 30 % d'azote en poids (Destain, 2011).

Enfin, la cyanamide calcique, non reprise dans la Figure 1, est obtenue par la réaction du N_2 avec du CaC_2 (Anonyme, 2008).

Les engrais azotés synthétisés sont associés à une matière de charge pour leur granulation.

La seule source géologique commerciale d'azote provient du désert d'Atacama dans le Nord du Chili mais cette source d'engrais n'est pas utilisée en Wallonie (Destain, 2011).

2.2.2. Teneur en ETM dans les engrais azotés

Les engrais azotés contiennent une matière de charge qui est la dolomie (Luxen et Godden, 2011). En Wallonie, celle-ci est fournie majoritairement par l'entreprise LHOIST. Aucune donnée sur les analyses des teneurs en ETM dans la dolomie n'a pu être récoltée auprès de la société LHOIST, mais des valeurs indicatives provenant de la norme NF U44A N 34 indiquent la présence d'ETM dans la dolomie.

Les valeurs principalement fournies par la norme sont les minima et maxima. Une valeur moyenne plausible a été reconstituée pour chacune de ces matières en ajoutant aux valeurs minimales 40 % de l'écart entre les extrêmes. Ce ratio de 40 % a été déterminé lors de la réalisation d'une étude sur les flux de contaminants sur les sols agricoles de France (ADEME, 2007). Pour les valeurs inférieures au seuil de détection, la valeur présentée correspond à la moitié de la valeur seuil.

Le Tableau 2 montre que la dolomie peut contenir des teneurs variables en ETM, les teneurs les plus importantes se trouvant pour le Zn (jusque 168 mg/kg MS ou ppm), le Cr (jusque 94 ppm) et l'As (jusque 50 ppm). Nous pouvons remarquer les teneurs relativement faibles pour l'Hg.

Tableau 2. Valeurs indicatives des teneurs en ETM dans les dolomies (Anonyme, 2003a).

Matière	Valeur	ETM (mg/kg MS)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
Dolomies	Min	0,60	0,0050	1,9	0,40	0,0050	0,015	0,80	0,050	0,015	2,1
	Max	50	7,4	94	10	1,0	10	20	19	28	168
	Médiane	3,7	0,60	5,7	3,7	0,20	0,40	2,5	2,0	0,45	6,8
	Moyenne	20	3,0	39	4,2	0,40	4,0	8,5	7,7	11	68

A partir du Tableau 3, on observe que le sulfate d'ammonium (NH_4SO_4) est l'engrais minéral azoté qui contient les teneurs les plus importantes en Mo (3,6 ppm) et Zn (7,2 ppm).

Le nitrate de soude ($NaNO_3$ ou nitrate du Chili) est une matière qui ne contient pas d'ETM à des teneurs plus élevées que les autres matières azotées. Cependant, il n'est pas utilisé en Belgique.

Par contre, la cyanamide calcique contient de l'As, Cr, Cu et Ni à des teneurs plus élevées par rapport aux autres engrais azotés avec des teneurs respectives de 0,7, 18, 7,3 et 10,5 ppm.

Le nitrate d'ammonium est plus riche en Cd, Hg et Se (avec 0,7, 0,11 et 12 ppm respectivement). Il est à noter que la valeur prise dans ce tableau correspond au nitrate d'ammonium dosant 33,5 % d'azote. Cette teneur est différente pour la Belgique et en particulier pour la Région wallonne qui utilise du nitrate d'ammonium dosant 27 % d'azote.

L'urée contient plus de Pb que les autres matières azotées minérales. Les données pour l'urée proviennent d'une étude menée par Otero *et al.* (2005).

Aucune valeur de teneur en ETM n'a été trouvée pour la solution azotée. Le procédé de fabrication de la solution azotée (pas de matière de charge ajoutée) permet de penser que les teneurs en ETM sont très faibles voire nulles.

Tableau 3. Valeurs indicatives des teneurs en ETM dans les fertilisants minéraux azotés (Anonyme, 2003a; Otero *et al.*, 2005) ; en vert, concentrations les plus faibles, en rouge, concentrations les plus élevées.

Matière		ETM (mg/kg MS)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
Sulfate d'ammonium	Min	0,25	0,010	0,050	2,3	0,015	0,020	0,39	0,45	0,010	0,075
	Max	0,50	0,60	2,1	6,2	0,050	9,0	6,6	1,70	0,30	18
	Moy	0,35	0,25	0,87	3,9	0,029	3,6	2,9	1,0	0,13	7,2
Nitrate de soude	Moy	0,50	0,0040	1,7	6,0	0,0070	0,31	0,50	0,20	1,1	3,0
Cyanamide calcique	Moy	0,70	0,010	18	7,3	0	1,0	10,5	1,0	0,36	4,0
Nitrate d'ammonium 33,5 % N	Min	0,050	0,50	6,0	0,50	0,015	0,25	1,0	0,25	0,050	1,0
	Max	0,20	1,0	7,3	14	0,25	1,0	1,0	1,1	29,0	2,7
	Moy	0,11	0,70	6,5	5,8	0,11	0,55	1,0	0,59	12	1,7
Urée (Otero *et al.*, 2005)	Moy	0,25	0,15	2,5	0,30			0,50	1,5		

☞ ***En conclusion**, les 10 ETM repris dans la norme NF U44A N 34 sont présents dans les engrais azotés. Cependant, pour certaines matières, certains ETM se retrouvent en plus grande quantité :*

- *sulfate d'ammonium : Mo, Zn ;*
- *cyanamide calcique : As, Cr, Cu, Ni ;*
- *nitrate d'ammonium : Cd, Hg, Se ;*
- *urée : Pb.*

Pour la solution azotée, l'absence de matière de charge ne permet pas, a priori, d'identifier une source de contamination.

2.2.3. Teneur en CTO dans les engrais azotés

Une étude québécoise (Fouchécourt et Beausoleil, 2001) a relevé des teneurs en dioxines dans l'urée, le nitrate d'ammoniaque et le nitrate d'ammoniaque calcique de 0,260, 0,263 et 0,262 ng PCDD/F-TEQ/kg MS. Les teneurs dans ces trois matières sont proches car, pour la plupart des composés dioxiniques, c'est la moitié de la limite de détection qui a été utilisée pour déterminer une teneur. Seuls les congénères hepta-CDD et octa-CDD ont été détectés dans l'urée et le nitrate d'ammoniaque calcique à des concentrations très faibles de l'ordre du pg/kg MS.

L'expression PCDD/F-TEQ permet d'évaluer la présence des dioxines sur base de leur toxicité. Il existe en effet plusieurs types de dioxines et composés apparentés aux dioxines. Chacun ayant un degré de toxicité spécifique. Afin de pouvoir exprimer la toxicité globale d'un mélange de composés dioxiniques en une seule valeur, le concept d' " Equivalents Toxiques Internationaux " (TEQ) a été créé. A chaque composé dioxinique est attribué un TEQ selon sa toxicité par rapport au TCDD (2,3,7,8-tetrachlorodibenzodioxine), le plus toxique. L'équivalent toxique global d'un mélange de dioxines est donc calculé en sommant les produits de la multiplication des quantités de chaque composé par leur TEQ (Van den Berg *et al.*, 1998).

Une étude récente sur les dioxines dans les matières fertilisantes belges (Dumortier *et al.*, 2011) rapporte, dans les matières fertilisantes minérales des teneurs d'un peu moins de 2 ng PCDD/F BEQ/kg MS par la méthode CALUX et d'un peu plus de 2,5 ng PCDD/F TEQ/kg MS par la méthode GC-MS. L'échantillon correspond à un mélange de différentes matières fertilisantes : nitrate d'ammonium, sulfate d'ammonium, chlorure de potassium, nitrate d'ammonium avec Mg, engrais composé NP, sulfonitrate d'ammonium et oxyde de magnésium. L'expression BEQ correspond à TEQ et signifie Bioanalytical Equivalent. Le terme « Bioanalytical » vient du fait que la méthode CALUX utilise des cellules de souris génétiquement modifiées pour détecter les dioxines.

2.3. Engrais phosphatés

2.3.1. Matières premières

Les ressources principales pour la fabrication des engrais phosphatés et autres matières phosphatées sont les roches phosphatées dont 75 % est d'origine marine (les roches sédimentaires), 10 -15 % d'origine ignée (principalement associées avec des complexes alcalins) et une petite portion provenant du guano (Anonyme, 2008).

Les roches phosphatées les plus courantes sont les phosphates tricalciques (groupe des apatites). Les autres groupes de minéraux phosphatés sont les crandallite, variscite et strengite. Ces groupes contiennent de l'Al et du Fe.

Les dépôts de phosphates sédimentaires (phosphates tricalciques) se trouvent dans beaucoup de régions du monde (Figure 2). Ce sont les ressources en phosphate les plus facilement exploitables. La sédimentation de la plupart des phosphates a eu lieu dans des environnements marins de faible profondeur (côtes). Actuellement, les gisements se trouvent en couches de quelques dizaines de

centimètres ou quelques mètres d'épaisseur. Ils sont constitués de grains de francolite cryptocristallin, avec du quartz, des argiles, des carbonates et dans certains cas, de la pyrite (Anonyme, 2008).

Les plus grandes réserves se trouvent en Afrique du Nord (Maroc, Tunisie), le Moyen-Orient (Jordanie, Syrie), les Etats-Unis, la Chine et la Russie (Anonyme, 2008).

En 2004, les principaux pays producteurs de roches phosphatées étaient les Etats-Unis (26 %), la Chine (18 %), le Maroc et le Sahara occidental (17 %), la Russie (8 %), la Tunisie (6 %), la Jordanie (5 %), le Brésil (4 %) et Israël (3 %) (Anonyme, 2008).

Les roches phosphatées sont naturellement riches en Cd, As et radionucléides. Ceci constitue une de leur caractéristique chimique spécifique (Anonyme, 2008).

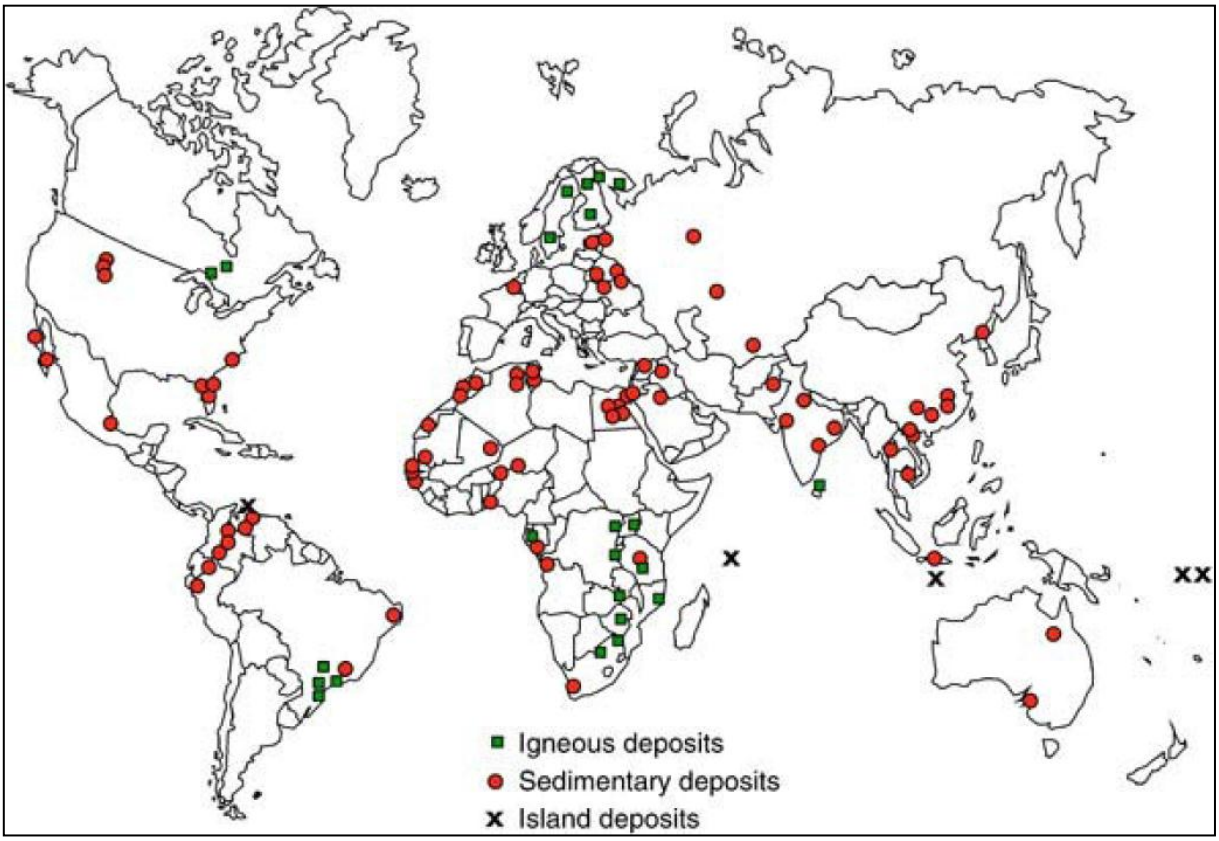

Figure 2. Dépôts mondiaux de roches phosphatées économiquement ou potentiellement économiquement exploitable (Anonyme, 2008).

2.3.2. Procédés de fabrication

Les engrais phosphatés sont produits à partir des roches phosphatées (phosphates tricalciques). A partir de la roche qui est extraite et broyée, on obtient le phosphate naturel (Figure 3).

Le procédé de solubilisation des phosphates requiert une réaction entre la roche phosphatée et des acides. Les acides les plus couramment utilisés sont les acides sulfuriques et phosphoriques. En Europe, l'usage d'acide nitrique est répandu (Anonyme, 2008).

Le soufre est la seconde matière première utilisée dans la fabrication des engrais phosphatés. Le soufre peut être utilisé sous forme d'acide sulfurique directement sur le phosphate naturel finement broyé. Cela donne le superphosphate normal ou simple (SSP) qui dose de 18 à 25 % de P_2O_5 (Anonyme, 2008). Le superphosphate simple contient environ 30 % de $Ca(H_2PO_4).H_2O$, 45 % de $CaSO_4.2H_2O$ (gypse), 10 % de $CaHPO_4$ (calcium biphosphate), 10 % d'oxyde de fer, silice et aluminosilicates et 5 % d'eau (Anonyme, 2008).

La réaction chimique entre l'acide sulfurique et une roche phosphatée, produit de l'acide phosphorique. Quand on applique cet acide phosphorique sur du phosphate naturel, on obtient alors le triple superphosphate (TSP), dosant de 38 à 45 % de P_2O_5. Les matières premières de phosphates (roches phosphatées) sont ainsi utilisées pour fabriquer le H_3PO_4 qui sera lui-même ajouté aux phosphates pour les rendre plus solubles. On peut donc supposer que la concentration en ETM dans les TSP est plus élevée car on concentre l'engrais phosphaté une deuxième fois.

L'addition de calcium donne le phosphate bicalcique et l'ajout d'ammoniac donne les phosphates d'ammoniac (MAP : mono ammonium phosphate et DAP : double ammonium phosphate, qui sont des engrais composés).

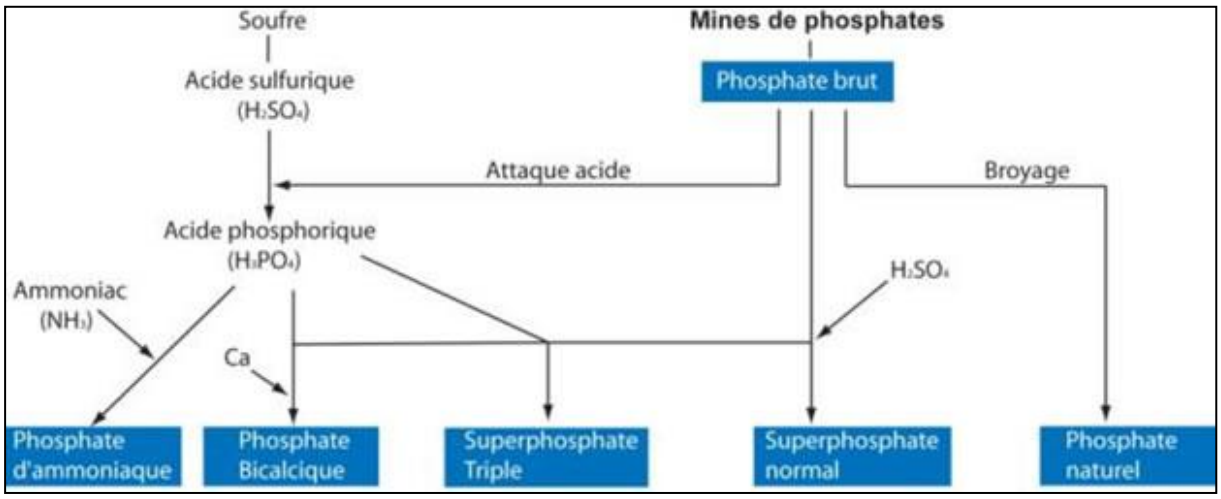

Figure 3. Schéma de fabrication des engrais phosphatés (UNIFA, 2011).

L'utilisation de certaines roches phosphatées dans la fabrication des fertilisants phosphatés peut contaminer le sol avec du Cd. C'est déjà un problème en Nouvelle-Zélande et en Australie (Adriano *et al.*, 2004).

2.3.3. Teneur en ETM dans les engrais phosphatés

a. Matières premières

En plus des éléments pour lesquels les roches phosphatées sédimentaires sont utilisées, il y a naturellement des traces de certains éléments métalliques. Les éléments potentiellement dangereux les plus communément rencontrés dans les roches phosphatées sont l'As, Cd, Cr, Hg, Pb, Se, U et V (Van Kauwenbergh, 2002). Les teneurs varient en fonction de la situation géographique des gisements (ADEME, 2007). Les engrais phosphatés sont ainsi connus pour contenir des niveaux variables d'ETM (Mortvedt, 1996) mais également des éléments radioactifs comme l'U, le Th, qui sont considérés comme toxiques pour la santé humaine et animale (Mortvedt et Sikora, 1992, Kpomblekou et Tabatabai, 1994 *in* (FAO, 2004)).

Les teneurs en ces éléments dangereux changent considérablement entre les sources de phosphates naturels et même au sein d'un même gisement. Au tableau 4, les résultats d'analyses chimiques sont présentés pour des éléments potentiellement dangereux dans des échantillons de phosphates naturels sédimentaires situés dans diverses régions du monde (Van Kauwenbergh,

1997 *in* (FAO, 2004)). On voit à partir de ce tableau que les teneurs en ETM varient fortement entre les différents dépôts.

Certaines sources de phosphates naturels peuvent contenir une quantité significative d'éléments radioactifs quand on les compare à d'autres phosphates naturels, par exemple 390 mg d'U sont contenus par kilogramme de phosphates naturels de Minjingu (République unie de Tanzanie) contre 12 mg d'U par kilogramme de phosphates naturels de Gafsa en Tunisie (Tableau 4).

Les matières premières qui sont utilisées pour la production d'engrais en Wallonie proviennent principalement du Maroc (Parmentier, 2011), de Syrie et de Finlande (Destain, 2011). Pour le Maroc, les roches phosphatées sont plus riches en Cr que celles des autres pays. Pour la Syrie, les teneurs ne sont pas particulièrement élevées (sauf Cr et V). Les phosphates provenant de Finlande ne figurent pas dans le tableau mais sont beaucoup plus purs et contiennent moins d'ETM car ce sont des roches ignées.

Selon une étude sur les phosphates en Europe (Nziguheba et Smolders, 2008), les engrais phosphatés fabriqués à partir de matières premières d'origine scandinave (roches ignées) ont généralement les teneurs les plus basses en ETM. Dans le cas du Cd, la teneur est inférieure à 100 mg Cd/kg pour les roches phosphatées de Floride (56 mg Cd/kg P) et de Russie (roches ignées) et peut aller jusqu'à 350 mg Cd/kg pour les phosphates d'Afrique (roches sédimentaires ; pour la Tunisie et le Maroc de 200 à 300 mg Cd/kg P) (Anonyme, 2008) (MacLaughin *et al.*, 1996 *in* (Nziguheba et Smolders, 2008)).

Selon Charter *et al.* (1993) *in* (Anonyme, 1999a), la teneur en ETM dans le minerai phosphaté peut augmenter avec la profondeur de la mine et ainsi, produire des matières phosphatées avec des teneurs plus élevées en Cd.

Tableau 4. Analyse chimique des éléments potentiellement dangereux dans des phosphates naturels sédimentaires (Van Kauwenbergh, 1997 *in* (FAO, 2004)) ; en vert, concentrations les plus faibles, en rouge, concentrations les plus élevées.

Pays	Dépôt	Teneur (mg/kg)							µg/kg
		As	Cd	Cr	Pb	Se	U	V	Hg
Algérie	Djebel Onk	6	13	174	3	3	25	41	61
Burkina Faso	Kodjari	6	<2	29	<2	2	84	63	90
Chine	Kaiyang	9	<2	18	6	2	31	8	209
Etats-Unis	Floride Centrale	6	6	37	9	3	59	63	371
Etats-Unis	Caroline du Nord	13	33	129	3	5	41	19	146
Inde	Mussoorie	79	8	56	25	5	26	117	1672
Jordanie	El Hassa	5	4	127	2	3	54	81	48
Mali	Tilemsi	11	8	23	20	5	123	52	20
Maroc	Khouribga	13	3	188	2	4	82	106	566
Niger	Parc W	4	<2	49	8	<2	65	6	99
Pérou	Sechura	30	11	128	8	5	47	54	118
République Arabe Syrienne	Khneifiss	4	3	105	3	5	75	140	28
République unie de Tanzanie	Minjingu	8	1	16	2	3	390	42	40
Sénégal	Taiba	4	87	140	2	5	64	237	270
Togo	Hahotoe	14	48	101	8	5	77	60	129
Tunisie	Gafsa	5	34	144	4	9	12	27	144
Vénézuela	Riecito	4	4	33	<2	2	51	32	60

D'autres dépôts de phosphates marocains existent et semblent faire l'objet d'une prochaine exploitation mais ceux-ci contiennent apparemment plus de Cd que les dépôts actuellement utilisés (Destain, 2011).

Lors du processus de production des engrais phosphatés, peu de métaux sont perdus, la plupart du Cd et des autres métaux restent avec les phosphates durant la fabrication (Wakefield, 1980 *in* (Mortvedt, 1996)).

Les roches phosphatées peuvent contenir également d'autres éléments potentiellement toxiques comme le Sb, V et les éléments de terre rares (Y, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu) (da Silva *et al.*, 2010).

b. Engrais phosphatés

Les engrais minéraux simples ou composés fabriqués à partir de ces roches peuvent ainsi contenir des ETM en concentration élevée (ADEME, 2007). En effet, la concentration en As, Cd, Cr, Ni, Pb et Zn est positivement corrélée avec la teneur en P. Les teneurs en Cd augmentent lorsque la concentration en P augmente (Otero *et al.*, 2005).

Cela confirme que la roche phosphatée est la source majeure de ces éléments (Nziguheba et Smolders, 2008). Le rapport Cd/P n'est pas très différent dans les engrais phosphatés par rapport à la roche phosphatée (MacLaughin *et al.*, 1996 *in* (Nziguheba et Smolders, 2008)).

Par rapport aux autres engrais phosphatés (Tableau 5), le superphosphate triple contient les teneurs les plus élevées en As, Cd, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb et Zn. Le fait que le TSP ait des teneurs supérieures pour tous les ETM semble être normal vu qu'il est produit en utilisant plus de roches phosphatées que les autre engrais phosphatés.

Le phosphate bicalcique montre systématiquement des teneurs plus basses pour tous les ETM. Cela est peut être dû à l'ajout de Ca qui tendrait à diluer les concentrations en ETM.

Le phosphate naturel tendre est le plus riche en Cu et Se.

Tableau 5. Valeurs indicatives des teneurs en ETM dans les fertilisants minéraux phosphatés (CSHPF, 1998; Anonyme, 2003a; ADEME, 2007) ; en vert, concentrations les plus faibles, en rouge, concentrations les plus élevées.

Matière	Valeur	ETM (mg/kg MS)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
Superphosphate normal	Min	2,9	4,6	83	9,5	0,050	2,0	14	0,76	0,74	160
	Max	2,9	5,5	135	21	0,20	2,6	50	5,7	5,0	180
	Moy	2,9	5,0	103	14	0,11	2,2	28	2,7	2,4	168
Superphosphate triple	Min	3,4[2]	44	240	8,8	0,12		18	2,5		290
	Max	9,3	44	380	8,8	0,12		62	5,5		290
	Moy	6,9	44	296	8,8	0,12	28[3]	36	3,7		290
Phosphate bicalcique	Moy	0,25	0,030	2,5	2,4	0	0,14	1,1	1,3	0,075	120
Phosphate naturel tendre	Min	3,4	8,1	130	10	0,050	3,3	13	2,1	1,0	130
	Max	6,2	26	190	26	0,040	18	49	4	90	370
	Moy	4,5	15	154	16	0,046	9,2	27	2,9	37	226

[2] Données NIPERA (Anonyme, 2007).
[3] Valeurs-guides des teneurs les plus fréquemment rencontrées pour les matières fertilisantes françaises (CSHPF, 1998).

2.3.4. Composés radioactifs dans les engrais

Les phosphates contiennent des traces de radionucléides qui proviennent des roches phosphatées. Ces composés sont l'U, le Ra et le Th. L'U dans les roches phosphatées varie aux alentours de 3-400 mg/kg dans les dépôts du monde entier (Mortvedt, 1992 *in* (Anonyme, 1999a)). Selon l'USEPA (1999), ces valeurs sont de l'ordre de 90-4800 Bq/kg et 40-5022 Bq/kg, respectivement pour l'U et le Ra. Les teneurs en Th sont plus faibles avec 16-622 Bq/kg.

Durant le processus de production, la plupart de l'U (jusque 67 % de la concentration initiale) et du Th reste dans la matière fertilisante phosphatée. Le Ra se retrouve principalement dans le phosphogypse ($CaSO_4$, sous-produit de la fabrication des engrais phosphatés soufrés) (Rutherford *et al.*, 1995 *in* (Anonyme, 1999a)). Le triple superphosphate (TSP) contient plus d'U que le superphosphate simple et l'acide phosphorique (pour les mêmes raisons que précédemment). Cela rend le TSP environ 3 fois plus concentré en U que l'acide phosphorique (Erdem *et al.*, 1996).

☞ ***En conclusion**, les 10 ETM repris dans la norme sont présents dans les engrais phosphatés. Cependant, pour certaines matières, certains ETM se retrouvent en plus grande quantité :*

- *pour phosphate naturel tendre : Cu, Se ;*
- *pour le triple superphosphate: As, Cd, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb, Zn.*

Il serait intéressant d'étudier les ETM moins connus comme le Sb, et le V ainsi que les éléments de terres rares (Y, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu).

Les composés radioactifs (U, Ra) seraient à prendre en considération eux aussi.

2.3.5. Teneur en CTO dans les engrais phosphatés

Une étude menée par l'USEPA (Anonyme, 1999c) rapporte une teneur de 0,49 ng PCDD/F-TEQ/kg MS d'engrais minéraux phosphatés.

2.4. Engrais potassiques

2.4.1. Matières premières

Par rapport aux autres engrais minéraux, les teneurs en ETM sont plus faibles pour les engrais potassiques (ADEME, 2007).

La fabrication des engrais potassiques est réalisée à partir des minerais extraits de différents gisements. Le minerai peut être de la sylvinite (KCl + NaCl), de la carnalite ($KCl . MgCl_2 . 6H_2O$) ou de la kaïnite ($4\ KCl . 4MgSO_4 . 11H_2O$) (UNIFA, 2011). Un autre minerai est la langbeinite ($K_2SO_4 . 2MgSO_4$) (Foth, 1990). Les cendres de bois sont également une source importante en cet élément ; elles contiennent quelques pourcents de K (Foth, 1990).

Les dépôts riches en potassium sont répartis dans le monde. Les plus grands gisements ont été formés durant le Dévonien et le Permien. C'est le cas des dépôts du Canada, des USA et de la Russie. Certains dépôts canadiens sont relativement purs en KCl et requièrent très peu de traitements.

Des mines de K ont été ouvertes en Allemagne à la fin du 19è siècle, à Carlsbad au Nouveau-Mexique au début du 20è siècle et au Saskatchewan (Canada) dans les années soixante. Ces dépôts de potassium sont des évaporites (précipitation des sels quand d'anciennes mers se sont évaporées). Les minéraux dans les dépôts sont représentatifs des sels se trouvant dans l'eau de mer ; principalement des sels de sodium et potassium (Foth, 1990). Actuellement, les principaux pays producteurs d'engrais potassiques sont le Canada, la Russie, la Biélorussie et l'Allemagne.

Les matières premières utilisées par la firme ROSIER pour fabriquer les engrais potassiques proviennent d'Allemagne (Parmentier, 2011). Le minerai qui en est extrait est la sylvinite.

2.4.2. Procédés de fabrication

Le traitement des minerais consiste à séparer le KCl des autres composés ; plus de 95 % du potassium des matières fertilisantes est du KCl.

Le potassium provient initialement de dépôts marins, le minerai contient donc du NaCl qui est séparé du KCl par recristallisation (procédé thermique), flottation ou séparation électrostatique.

Le traitement le plus répandu est la flottation. Le minerai est broyé et mélangé à l'eau (suspension). Par injection d'air, les cristaux de KCl flottent et sont récoltés puis séchés et triés pour obtenir la taille de particule voulue. L'engrais KCl contient alors 60 % de K (Anonyme, 2008).

Le procédé thermique est basé sur la différence de solubilité entre le NaCl et le KCl. Dans le procédé électrostatique le sel brut est finement moulu et traité avec des réactifs. Le tout est passé au travers de champs magnétiques dans une tour de chute qui sépare le KCl du NaCl (Anonyme., 2011b).

La Figure 4 montre qu'à partir des minerais de potasse, il est possible de fabriquer :

- du KCl par élimination du NaCl ;
- du K_2SO_4 par ajout d'acide sulfurique ;
- du sulfate de potassium contenant du sel de Mg à partir de la langbeinite.

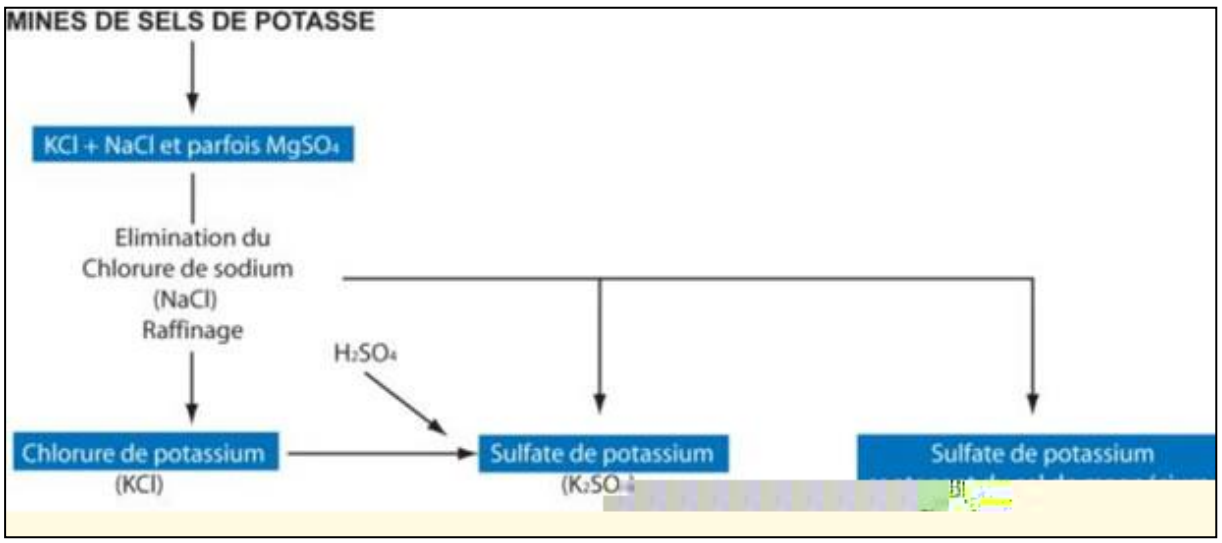

Figure 4. Schéma de fabrication des engrais potassiques (UNIFA, 2011).

Le K_2SO_4 est la principale source de fertilisants sans chlore (UNIFA, 2011). Un autre engrais issu de la transformation est le KNO_3 (Anonyme, 2008), quasiment pas utilisé en Wallonie (Destain, 2011).

2.4.3. Teneur en ETM dans les engrais potassiques

Le Tableau 6 montre que les teneurs les plus élevées en ETM se trouvent dans le chlorure de potassium et le sulfate de potassium.

Le chlorure de potassium contient du Cd, du Ni et du Pb en quantité plus élevée que les autres engrais minéraux potassiques (0,23, 2,7 et 0,81 ppm respectivement).

Le sulfate de potassium a des teneurs plus élevées en As, Cr, Cu, Hg, Mo, Se et Zn (avec 0,95, 3,7, 5,9, 0,07, 2,1, 2 et 11 ppm respectivement). Une source de contamination possible du sulfate de potassium pourrait être le soufre utilisé dans le procédé de fabrication.

2.5. Engrais composés

Parmi les matières fertilisantes minérales, les engrais composés contiennent les plus hautes concentrations en ETM (Anonyme, 1999a).

2.5.1. Production

Les engrais composés contiennent deux ou trois éléments majeurs. Ils sont fabriqués par réaction chimique ou par mélange à partir des engrais simples (UNIFA, 2011).

Dans la production de fertilisants sous forme de granulés, les matières premières sont mélangées ensemble avec un peu d'eau ou d'acides avec d'autres solutions de fertilisants pour former une bouillie épaisse. Le mélange est fait dans un tambour tournant et chauffant, où les particules de différentes tailles se forment lorsque le produit sèche, ce qui produit des granulés. Des matières telles que la terre de diatomées ou de la kaolinite est ajoutée pour produire un « coating » autour du granulé, qui inhibe l'adsorption d'eau à partir de l'air et prévient la formation d'agglomérats (Foth, 1990).

2.5.2. Teneur en ETM dans les engrais composés

Le Tableau 7 nous montre que les teneurs les plus élevées, pour les 10 ETM repris dans la norme AFNOR, se trouvent donc dans les engrais contenant du phosphore. Pour l'As, Cr, Ni, Pb, Se et Zn, ce sont les engrais NP qui en contiennent le plus. Pour le Cd et Hg, ce sont les engrais PK superpotassiques. Pour le Cu et Mo, ce sont les engrais NPK qui ont les teneurs les plus élevées. Ces teneurs en ETM sont suspectées d'être liées à la présence de phosphates dans les engrais composés (Mortvedt, 1996). Les teneurs les plus basses pour les 10 ETM se trouvent dans les engrais NK. Cette forme d'engrais est la seule qui ne contienne pas de phosphore.

Parmi les engrais composés, les engrais NP ont les teneurs les plus élevées en As, Cr, Ni, Pb, Se et Zn avec respectivement 8,5, 248, 40, 33, 0,76 et 588 ppm. La concentration en ETM (Cd, Pb, Cr, Cu, Zn) dans les MAP, DAP et TSP suit l'ordre suivant : MAP < DAP < TSP ((Anonyme, 1999a) selon les chiffres de Charter *et al.*, 1993).

Les engrais PK contiennent des quantités supérieures en Cd et Hg (58 et 0,25 respectivement).

Les engrais NPK contiennent plus de Cu et de Mo que les autres matières (67 ppm et 5,2 ppm respectivement).

Tableau 7. Valeurs indicatives des teneurs en ETM dans les fertilisants minéraux composés (Anonyme, 2003a) ; en vert, concentrations les plus faibles, en rouge, concentrations les plus élevées.

Matière	Valeur	ETM (mg/kg MS)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
Engrais NP	Min	0,10	15	140	8,7	0,050	4,2	19	0,80	0,40	560
	Max	21	31	410	21	0,25	4,2	72	81	1,3	630
	Moy	8,5	21	248	14	0,13	4,2	40	33	0,76	588
Engrais NK	Moy	0,60	0,0075	4,5	12	0,0075	2,6	6,0	0,40	0,010	22
Engrais PK superpotassique	Min	4,4	32	130	18	0,050	1,9	0,50	1,4	0,050	50
	Max	7,5	97	410	23	0,55	9,6	26	5,5	0,94	150
	Moy	5,6	58	242	20	0,25	5,0	11	3,0	0,41	90
Engrais NPK	Min	0,010	0,025	1,6	5,2	0,0050	0,075	0,60	0,030	0,020	10
	Max	14	13	140	160	0,55	13	20	40	1,8	300
	Moy	5,6	5,2	57	67	0,22	5,2	8,4	16	0,73	126

☞ *Comme pour les engrais simples, les 10 ETM repris dans la norme sont présents dans les engrais composés. Cependant, pour certaines matières, certains ETM se retrouvent en plus grande quantité :*

- *engrais NP (dont MAP et MAP) : As, Cr, Ni, Pb, Se, Zn ;*
- *engrais PK superpotassiques : Cd, Hg ;*
- *engrais NPK : Cu, Mo*

2.5.3. Teneur en CTO dans les engrais composés

Des teneurs en dioxines dans le MAP et le DAP de 0,263 et 0,263 ng PCDD/F-TEQ/kg MS ont été trouvées par Fauchécourt et Beausoleil (2001). Les teneurs dans ces trois matières sont proches car, ici aussi, pour la plupart des composés dioxiniques, c'est la moitié de la limite de détection qui a été utilisée pour déterminer une teneur. Seulement les congénères hepta-CDD et octa-CDD ont été détectés dans le MAP et le DAP à des concentrations très faibles de l'ordre du pg/kg MS.

2.6. Engrais calcaires

2.6.1. Matières premières

Les engrais calcaires proviennent de la roche extraite des carrières. Ils sont soit utilisés directement après broyage, soit calcinés à très haute température dans des fours à chaux et puis broyés.

Actuellement, en Wallonie, 90 à 95 % des engrais calcaires utilisés sont sous forme crue (roche broyée) (Hubin, 2011).

Les roches calcaires sont utilisées pour le chaulage des sols agricoles. Il existe différents types de roches calcaires, selon le ratio Ca/Mg. Avec l'augmentation de la part de Mg, les roches sont successivement dites calcique, dolomitique et finalement, avec un rapport de 1/1, on parle de dolomie. Les marnes et les craies sont aussi des engrais calcaires. Le gypse est une autre source de Ca qui est utilisée lorsqu'il manque du Ca mais lorsque le pH le permet (Adriano *et al.*, 2004).

Des sous-produits d'industrie comme les scories, cendres, boues peuvent être utilisés comme amendements calcaires (Adriano *et al.*, 2004).

L'appellation engrais calcaires est trompeuse dans le sens où l'utilisation principale se fait en tant qu'amendement. Une matière qui pourrait sans ambiguïté être appelée engrais calcaire est le gypse ($CaSO_4$) dont le Ca est apporté pour la plante et non pour le sol (pas de modification du pH).

2.6.2. Procédé de fabrication

La roche calcaire qui est extraite des mines est concassée plusieurs fois et lavée. Les produits crus ($CaCO_3$, (Ca, Mg) CO_3) sont obtenus par le broyage des concassas. Les produits cuits sont fabriqués à partir des concassas qui sont chauffés dans un four. La chaux vive qui en résulte est alors soit utilisée telle quelle (chaux en roche), soit broyée (chaux broyée), soit hydratée plus ou moins fortement (chaux hydratée voire lait de chaux) (Carmeuse, 2011).

2.6.3. Teneur en ETM dans les engrais calcaires

Pour les ETM, la seule source apparente de contamination des engrais calcaires est donc la roche calcaire qui est employée pour la fabrication.

Les produits crus que sont les carbonates et les dolomies ne sont pas parmi les matières amendentes les plus contaminées par les ETM ; mis à part le Zn (13 ppm ; comme la chaux vive magnésienne) pour les carbonates et l'As (3,7 ppm) pour la dolomie (Tableau 8).

Par rapport aux autres engrais calcaires, la chaux vive calcique présente des teneurs supérieures pour le Mo et Pb (7 et 2,5 ppm respectivement). La chaux vive magnésienne est plus riche en Cd, Cr, Hg, Pb, Se et Zn (1,1, 14, 1,6, 2,5, 0,6 et 13 ppm respectivement).

L'oxyde de Mg a les plus fortes teneurs en Cu, Ni et Pb (42, 326 et 2,5 ppm respectivement).

Tableau 8. Valeurs indicatives des teneurs en ETM dans les engrais calcaires (Anonyme, 2003a) ; en vert, concentrations les plus faibles, en rouge, concentrations les plus élevées.

Matière	Valeur	ETM (mg/kg MS)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
Carbonates	Min	0,025	0,0050	0,050	0,25	0,0050	0,015	0,0050	0,015	0,010	3,0
	Max	83	3,8	22	8,7	0,50	7,1	15	15	16	48
	Méd	1,1	0,15	3,9	4,0	0,020	0,20	2,3	0,70	0,50	13
Dolomies	Min	0,60	0,0050	1,9	0,40	0,0050	0,015	0,80	0,050	0,015	2,1
	Max	50	7,4	94	10	1,0	10	20	19	28	168
	Méd	3,7	0,60	5,7	3,7	0,20	0,40	2,5	2,0	0,45	6,8
Chaux vives calciques	Min	0,010	0,010	0,010	1,0	0,0050	0,050	0,010	0,010	0,010	1,3
	Max	50	41	60	14	3,1	11	29	33	44	149
	Méd	1,7	0,35	6,2	6,3	0,25	7,0	2,5	2,5	0,58	8,9
Chaux vives magnésiennes	Min	0,60	0,025	2,0	2,0	0,0050	0,025	1,8	1,0	0,050	3,0
	Max	50	19	43	12	5,0	11	35	4,4	27	18
	Méd	0,80	1,1	14	5,2	1,6	2,5	3,7	2,5	0,60	13
Oxyde de magnésium	Min	0,20	0,025	2,5	50	0,0050	0,50	5,5	2,5	0,050	6,5
	Max	0,30	1,0	7,8	50	0,0050	0,95	387	2,5	0,050	6,5
	Méd	0,25	0,80	6,6	42	0,0050	0,80	326	2,5	0,040	5,4

☞ ***En conclusion**, les 10 ETM repris dans la norme sont présents dans les engrais calcaires. Cependant, pour certaines matières, certains ETM se retrouvent en plus grande quantité :*

- carbonates : Zn ;
- dolomies : As ;
- chaux vives calciques : Mo, Pb ;
- chaux vives magnésiennes : Cd, Cr, Hg, Pb, Se, Zn ;
- oxyde de magnésium : Cu, Ni, Pb.

2.7. Conclusions pour les matières fertilisantes minérales

Au niveau européen et belge, aucune règlementation ne fixe de valeur limite en ETM dans les engrais minéraux.

Toutes les matières fertilisantes minérales contiennent des quantités variées d'ETM mais ce sont principalement les engrais phosphatés, composés et les matières amendentes qui en contiennent le plus. Notons que, pour toutes les matières minérales, les teneurs en Hg sont relativement faibles.

Pour les engrais phosphatés, ce sont principalement le Cd, le Cr, le Mo, le Se et le Zn qui se trouvent en plus grande concentration. Pour les engrais composés, ce sont le Cu, le Pb et le Zn. Pour les matières amendentes, ce sont l'As, le Hg et le Ni.

Les engrais azotés et surtout potassiques sont relativement peu chargés en ETM, ils présentent les teneurs les plus faibles pour tous les ETM, sauf le Se dans le cas des engrais azotés.

En ce qui concerne les CTO, très peu d'études sont réalisées à ce sujet. Pour les composés dioxiniques, les teneurs sont très faibles (de l'ordre du ng/kg MS) et souvent très proches voire inférieures à la limite de détection.

3. ENGRAIS DE FERME

3.1. Introduction

Les aliments destinés aux animaux d'élevage constituent la source principale de contamination des engrais de ferme via les urines et les matières fécales. Il existe un lien étroit entre les ETM contenus dans l'alimentation et ceux qui se retrouvent dans les matières fécales et les urines des animaux (Nicholson *et al.*, 2003). Une étude chinoise (Xiong *et al.*, 2010) a par exemple trouvé des relations positives entre les concentrations en Cu dans les aliments et les matières fécales de porcs, bovins et volailles. D'autres ETM comme le Zn peuvent également se retrouver dans les rations alimentaires des animaux d'élevage et contaminer les engrais de ferme qui sont produits. Ceci est d'autant plus facile à comprendre que les animaux peuvent seulement absorber 5 - 15 % des ETM ingérés. La majeure part des ETM ingérés sont excrétés et se retrouvent donc dans l'environnement (Steinfeld *et al.*, 2006). Les sources de contamination liées à l'alimentation des animaux ne concernent pas uniquement les aliments eux-mêmes mais également les additifs qui sont ajoutés aux aliments pour en améliorer leurs caractéristiques ou pour répondre aux besoins nutritionnels des animaux et en favoriser la production.

Les médicaments vétérinaires administrés oralement et par injection sont excrétés dans les matières fécales. Les substances médicamenteuses sont donc aussi introduites dans l'environnement lorsque les engrais de ferme sont épandus (Kümmerer, 2008). La fixation des antibiotiques dans le sol dépendra des espèces ioniques présentes et des caractéristiques des particules cibles.

Le devenir de ces substances (aliments, additifs ou médicaments) dans le processus de production animale est un sujet de préoccupation complexe de par la diversité de ses composantes : santé animale, gestion des engrais de ferme générés, composantes environnementales, répercussions des épandages sur la fertilité des sols et des rejets sur la qualité des ressources en eau et des cultures entrant dans l'alimentation humaine. L'attention doit être portée notamment sur une meilleure connaissance de chaque ingrédient, de chaque substance, de chaque composant, quant à sa nature, son origine, ses procédés d'obtention, de conservation, de transformation, ainsi que sur la traçabilité tout au long de la chaîne afin de pouvoir évaluer les risques potentiels et mettre en place des plans de surveillance.

Dans cette étude une réflexion a été menée afin d'évaluer et de maîtriser les risques associés aux systèmes de production animale. Cette approche a nécessité la synthèse de données réglementaires et scientifiques permettant d'identifier les dangers des matières premières ou des substances utilisées en prenant en compte la probabilité de contamination des engrais de ferme.

3.2. Aliments pour animaux

3.2.1. Définition réglementaire

Le Règlement 178/2002 CE du Parlement européen et du Conseil du 28 janvier 2002 établissant les principes généraux et les prescriptions générales de la législation alimentaire (Anonyme, 2002c), instituant l'Autorité européenne de sécurité des aliments et fixant des procédures relatives à la sécurité des denrées alimentaires définit un « aliment pour animaux » comme toute substance ou produit, y compris les additifs, transformé, partiellement transformé ou non transformé, destiné à l'alimentation des animaux par voie orale.

3.2.2. Substances indésirables

En ce qui concerne les substances indésirables pouvant se trouver dans les aliments pour animaux, il faut se rapporter à la Directive 2002/32/CE du Parlement européen et du Conseil du 7 mai 2002 modifiée par le Règlement (UE) 574/2011 de la Commission du 16 juin 2011 (Anonyme, 2002a; Anonyme, 2011b). Cette dernière directive définit une « substance indésirable » comme toute substance ou tout produit, à l'exception des agents pathogènes, qui est présent dans et/ou sur le produit destiné aux aliments pour animaux et qui présente un risque potentiel pour la santé animale ou la santé humaine ou l'environnement ou qui serait susceptible de nuire à la production animale. L'article 3 de la directive mentionne également que les produits destinés aux aliments pour animaux sont considérés comme non conformes si leur teneur en substances indésirables dépasse les teneurs maximales fixées. Les teneurs maximales admises dans les différentes matières entrant dans la composition des aliments pour animaux sont fixées pour que les teneurs soient acceptables dans l'aliment complet final (Dumont de Chassart, 2011).

Le Règlement (UE) 574/2011 fixe des teneurs maximales pour l'As, Cd, Hg, Pb et deux groupes de dioxines dans les matières premières d'aliments pour animaux. Les valeurs ETM sont exprimées en ppm dans les aliments ; celles des dioxines sont exprimées en ng OMS-PCDD/F-TEQ[4] par kg d'aliment.

Ces valeurs maximales ont été reportées, par type de produits destinés à l'alimentation animale, dans les tableaux 9 à 14. C'est sur cette base que les risques de contamination des engrais de ferme doivent être définis.

Les teneurs en substances indésirables dans les aliments pour animaux sont contrôlées par l'AFSCA sur le territoire belge. Selon le rapport d'activités 2010 de l'AFSCA (Ghafir et Coosemans, 2011), aucun échantillon d'aliments pour animaux prélevé au cours de l'année 2010 ne dépassait les normes.

Si d'autres substances indésirables que celles mentionnées dans les textes règlementaires sont détectées, la « tolérance zéro » est en principe appliquée. Le comité scientifique compétant en la matière tranche sur base des risques encourus par la présence de la substance indésirable (Dumont de Chassart, 2011).

Les hormones et les antibiotiques administrés à titre préventif et destinés à améliorer la croissance des animaux sont des substances interdites dans les aliments pour animaux (Ghafir et Coosemans, 2011). Presque tous les échantillons d'aliments composés analysés par l'AFSCA en 2010 sont conformes à cette exigence (99,9 % des 672 échantillons pour les hormones et 98,9 % des 648 échantillons pour les antibiotiques).

3.2.3. Matières premières pour aliments des animaux

a. Définition règlementaire

Les «matières premières pour aliments des animaux» sont les produits d'origine végétale ou animale dont l'objectif principal est de satisfaire les besoins nutritionnels des animaux, à l'état naturel, frais ou conservés, et les dérivés de leur transformation industrielle, ainsi que les substances organiques ou inorganiques, comprenant ou non des additifs pour l'alimentation animale, qui sont destinés à être utilisés pour l'alimentation des animaux par voie orale, soit directement en l'état, soit après transformation, ou pour la préparation d'aliments composés pour animaux ou en tant que supports des prémélanges (définition du Règlement 767/2009/CE du

[4] Voir explications point 2.2.3., §2.

Parlement Européen et du Conseil du 13 juillet 2009 concernant la mise sur le marché et l'utilisation des aliments pour animaux (Anonyme, 2009)).

Le Règlement 242/2010 de la Commission du 19 mars 2010 portant création du catalogue des matières premières pour aliments des animaux contient une liste non exhaustive des principales matières premières pour aliments des animaux (Anonyme, 2010b).

b. Teneurs maximales en contaminants

Le Tableau 9 reprend les teneurs maximales autorisées en substances indésirables dans les matières premières des aliments pour animaux.

Les matières premières des aliments pour animaux ne peuvent contenir plus de 2 mg As/kg, 10 mg Pb/kg et 0,1 mg Hg/kg. Les teneurs maximales fixées en Cd varient en fonction de la nature minérale, végétale ou animale de la matière première. Elles sont respectivement de 2 mg, 1 mg et 2 mg Cd/kg. Pour chacun de ces éléments, des exceptions sont admises.

Ainsi, pour l'As, la teneur maximale fixée de manière générale (2 mg As/kg) est rehaussée pour trois matières premières d'origine minérale, trois d'origine végétale et une d'origine animale.

Pour les matières premières d'origine minérale, ce sont :

- le carbonate de calcium (15 mg As/kg) ;
- l'oxyde de magnésium et carbonate de magnésium (20 mg As/kg) ;
- les phosphates et les algues marines calcaires (10 mg As/kg).

Pour les matières premières d'origine végétale, ce sont :

- la farine d'algues marines et les matières premières des aliments pour animaux dérivées d'algues marines (40 mg As/kg) ;
- les farines d'herbes, de luzerne et de trèfle déshydraté, les pulpes séchées de betteraves sucrières, les pulpes séchées, la mélasse de betteraves sucrières et les tourteaux de pression de palmiste (4 mg As/kg).

Pour les matières premières d'origine animale, ce sont les poissons et autres animaux aquatiques et leurs produits dérivés (25 mg As/kg).

La limite maximale de Cd dans les phosphates (matière première d'origine minérale) est fixée à 10 mg Cd/kg.

Pour le Pb, des exceptions sont admises pour le carbonate de calcium (20 mg Pb/kg), les phosphates et algues marines calcaires (15 mg Pb/kg), les fourrages (30 mg Pb/kg) et levures (5 mg Pb/kg).

Le carbonate de calcium peut contenir jusqu'à 0,3 mg Hg/kg. Les poissons et autres animaux aquatiques et leurs produits dérivés jusqu'à 0,5 mg Hg/kg.

Tableau 9. Teneurs maximales en substances indésirables dans les matières premières des aliments pour animaux (Annexe I du Règlement UE 574/2011 (Anonyme, 2011b)).

Matières premières des aliments pour animaux	Teneur maximale en mg/kg (ppm) d'aliments pour animaux d'une teneur en humidité de 12 %				Teneur maximale en ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg (ppt) d'aliments pour animaux d'une teneur en humidité de 12 %	
	As	Cd	Pb	Hg	PCDD/Fs	PCDD/Fs et PCB
Matières premières des aliments pour animaux	2		10	0,1		
Matières premières des aliments pour animaux d'origine minérale		2			1	1,5
Carbonate de calcium	15		20	0,3		
Oxyde de magnésium et carbonate de magnésium	20					
Phosphates		10				
Phosphates et algues marines calcaires	10		15			
Matières premières des aliments pour animaux d'origine végétale		1			0,75	1,25
Farine d'algues marines et matières premières des aliments pour animaux dérivées d'algues marines	40					
Farines d'herbes, de luzerne déshydratée et de trèfle déshydraté ainsi que pulpe séchée de betteraves sucrières et pulpe séchée, mélassée de betteraves sucrières	4					
Fourrages (le foin, le fourrage ensilé, l'herbe fraîche, etc)			30			
Huiles végétales et leurs sous-produits					0,75	1,5
Tourteaux de pression de palmiste	4					
Matières premières des aliments pour animaux d'origine animale		2				
Huile de poisson					6	24
Hydrolysats de protéines de poisson contenant plus de 20 % de matières grasses					2,25	11
Levures			5			
Matières grasses animales, y compris les matières grasses du lait et de l'œuf					2	3
Poissons et autres animaux aquatiques et leurs produits dérivés	25			0,5		
Poissons et autres animaux aquatiques et leurs produits dérivés, à l'exception de l'huile de poisson et des hydrolysats de protéines de poisson contenant plus de 20 % de matières grasses					1,25	4,5
Autres produits d'animaux terrestres, y compris le lait et les produits laitiers et les oeufs et les ovoproduits					0,75	1,25

Les teneurs maximales en dioxines varient en fonction de la nature minérale, végétale ou animale de la matière première. Les matières premières d'origine minérale ne peuvent pas contenir plus de 1 et 1,5 ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg de dioxines du « groupe 1 » (PCDD/Fs) et du « groupe 2 » (PCDD/Fs et PCB), respectivement.

Les matières premières d'origine végétale ne peuvent pas contenir plus de 0,75 et 1,25 ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg de dioxines du groupe 1 et 2, respectivement ; sauf pour les huiles végétales et leurs sous-produits qui peuvent contenir un maximum de 1,5 ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg du groupe 2.

Pour les matières premières d'origine animale, cinq matières sont règlementées pour les dioxines du groupe 1 et 2. Ce sont l'huile de poisson (6 et 24 ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg, respectivement), les hydrolysats de protéines de poisson contenant plus de 20 % de matières grasses (2,25 et 11 ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg, respectivement), les matières grasses animales, y compris les matières grasses du lait et de l'œuf (2 et 3 ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg, respectivement), les poissons et autres animaux aquatiques et leurs produits dérivés, à l'exception de l'huile de poisson et des hydrolysats de protéines de poisson contenant plus de 20 % de matières grasse (1,25 et 4,5 ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg, respectivement) et les autres produits d'animaux terrestres, y compris le lait et les

produits laitiers, les œufs et les ovoproduits (0,75 et 1,25 ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg, respectivement).

Potentiellement, les sources les plus importantes de contamination des aliments en ETM sont donc les matières premières d'origine minérale mais aussi, assez curieusement, certaines matières premières végétales comme les farines d'algues marines et les fourrages, en fonction de leur origine. Pour les dioxines, ce sont les huiles de poissons qui présentent les valeurs maximales les plus élevées et par là, qui peuvent se traduire par un risque accru. La consommation de ces matières dans les aliments pour animaux est cependant difficile à évaluer par manque de statistiques officielles. Dans le cadre de ce projet, un des objectifs de l'analyse des données sur les engrais de ferme (bibliographie et échantillonnage) sera de vérifier s'il y a éventuellement une corrélation entre ces valeurs maximales admissibles et les teneurs retrouvées dans ces matières.

3.2.4. Aliments composés

a. Définition règlementaire

Un «aliment composé pour animaux» est un mélange d'au moins deux matières premières pour aliments des animaux, comprenant ou non des additifs pour l'alimentation animale, qui est destiné à l'alimentation animale par voie orale, sous la forme d'un aliment complet pour animaux ou d'un aliment complémentaire pour animaux (définition du Règlement 767/2009/CE (Anonyme, 2009)).

b. Teneurs maximales en contaminants

Les aliments composés pour animaux ne peuvent contenir plus de 0,1 mg Hg/kg et 0,75 ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg et 1,5 ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg de dioxines du groupe 1 et 2 respectivement (Tableau 10). Les aliments minéraux peuvent contenir au maximum 0,2 mg Hg/kg.

Tableau 10. Teneurs maximales en substances indésirables dans les aliments composés (Annexe I du Règlement UE 574/2011 (Anonyme, 2011b)).

Aliments composés ou prémélanges	Teneur maximale en mg/kg (ppm) d'aliments pour animaux d'une teneur en humidité de 12 %				Teneur maximale en ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg (ppt) d'aliments pour animaux d'une teneur en humidité de 12 %	
	As	Cd	Pb	Hg	PCDD/Fs	PCDD/Fs et PCB
Aliments composés pour animaux				0,1	0,75	1,5
Aliments minéraux				0,2		

3.2.5. Prémélanges

a. Définition règlementaire

La Règlement 1831/2003/CE du Parlement européen et du Conseil du 22 septembre 2003 (Anonyme, 2003c) définit les « pré-mélanges » comme les mélanges d'additifs pour l'alimentation animale ou mélanges d'un ou de plusieurs additifs pour l'alimentation animale avec des matières premières pour aliments des animaux ou de l'eau utilisées comme supports, qui ne sont pas destinés à l'alimentation directe des animaux.

b. Teneurs maximales en contaminants

Les prémélanges pour aliments pour animaux ne peuvent contenir plus de 15 mg Cd/kg, 200 mg Pb/kg et 1 ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg et 1,5 ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg de dioxines du groupe 1 et 2 respectivement (Tableau 11). La teneur maximale fixée pour les prémélanges tient compte des additifs présentant la teneur en Pb et en Cd la plus élevée, et non de la sensibilité des différentes espèces animales au plomb et au cadmium. Pour protéger la santé publique et la santé animale, il

incombe au producteur de prémélanges d'assurer non seulement leur conformité aux teneurs maximales pour les prémélanges, mais aussi la conformité de leur mode d'emploi aux teneurs maximales pour les aliments complémentaires et complets.

Tableau 11. Teneurs maximales en substances indésirables dans les prémélanges (Annexe I du Règlement UE 574/2011 (Anonyme, 2011b)).

Aliments composés ou prémélanges	Teneur maximale en mg/kg (ppm) d'aliments pour animaux d'une teneur en humidité de 12 %				Teneur maximale en ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg (ppt) d'aliments pour animaux d'une teneur en humidité de 12 %	
	As	Cd	Pb	Hg	PCDD/Fs	PCDD/Fs et PCB
Prémélanges		15	200		1	1,5

3.2.6. Aliments complémentaires

a. Définition règlementaire

Le Règlement 767/2009/CE définit «aliment complémentaire pour animaux» comme un aliment composé pour animaux qui a une teneur élevée en certaines substances mais qui, en raison de sa composition, n'assure la ration journalière que s'il est associé à d'autres aliments pour animaux.

Un «aliment minéral» est un aliment complémentaire pour animaux contenant au moins 40 % de cendres brutes (Règlement 767/2009/CE).

b. Teneurs maximales en contaminants

Les aliments complémentaires ne peuvent pas contenir plus de 4 mg As/kg, 0,5 mg Cd/kg et 10 mg Pb/kg (Tableau 12).

Pour les compléments minéraux, des valeurs limites de 12 mg As/kg et de 15 mg Pb/kg sont admises. En fonction de leur teneur en P (plus ou moins de 7 %), des valeurs limites de 5 à 7,5 mg Cd/kg sont admises.

Les pierres à lécher sont un exemple d'aliment complémentaire minéral.

Tableau 12. Teneurs maximales en substances indésirables dans les aliments complémentaires (Annexe I du Règlement UE 574/2011 (Anonyme, 2011b)).

Aliments complémentaires	Teneur maximale en mg/kg (ppm) d'aliments pour animaux d'une teneur en humidité de 12 %				Teneur maximale en ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg (ppt) d'aliments pour animaux d'une teneur en humidité de 12 %	
	As	Cd	Pb	Hg	PCDD/Fs	PCDD/Fs et PCB
Aliments complémentaires	4	0,5	10			
Aliments minéraux	12		15			
Aliments minéraux (<7 % de P)		5				
Aliments minéraux (≥7 % de P)		7,5				

3.2.7. Aliments complets

a. Définition règlementaire

Un «aliment complet pour animaux» est un aliment composé pour animaux qui, en raison de sa composition, suffit à assurer une ration journalière (Règlement 767/2009/CE (Anonyme, 2009)).

b. Teneurs maximales en contaminants

Les aliments complets ne peuvent pas contenir plus de 2 mg As/kg, 0,5 mg Cd/kg et 5 mg Pb/kg ; exception faite pour les aliments complets pour bovins (veaux exceptés) (1 mg Cd/kg) (Tableau 13)

Tableau 13. Teneurs maximales en substances indésirables dans les aliments complets (Annexe I du Règlement UE 574/2011 (Anonyme, 2011b)).

Alimments complets	Teneur maximale en mg/kg (ppm) d'aliments pour animaux d'une teneur en humidité de 12 %				Teneur maximale en ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg (ppt) d'aliments pour animaux d'une teneur en humidité de 12 %	
	As	Cd	Pb	Hg	PCDD/Fs	PCDD/Fs et PCB
Aliments complets	2	0,5	5			
Aliments complets pour bovins (veaux exceptés), ovins (agneaux exceptés), caprins (chevreaux exceptés) et poissons		1				

3.2.8. Additifs pour l'alimentation animale

Les additifs sont une source de contamination des matières fécales. Ils sont en effet incorporés dans les prémélanges et les aliments composés pour en améliorer les caractéristiques ou pour répondre aux besoins nutritionnels des animaux et en favoriser la production (Ghafir et Coosemans, 2011).

a. Définition règlementaire

Le Règlement 1831/2003/CE (Anonyme, 2003c) définit les «additifs pour l'alimentation animale» comme étant des substances, micro-organismes ou préparations, autres que les matières premières pour aliments des animaux et les prémélanges, délibérément ajoutés aux aliments pour animaux ou à l'eau pour remplir notamment une ou plusieurs des fonctions visées à l'article 5, paragraphe 3. Ce règlement décrit la procédure communautaire pour l'autorisation de mise sur le marché et l'utilisation des additifs pour l'alimentation animale et établit des règles pour la surveillance et l'étiquetage en vue d'assurer un niveau élevé de protection de la santé humaine, de la santé et du bien-être des animaux ou de l'environnement.

b. Types d'additifs

Il existe différents types d'additifs. Ce sont les additifs technologiques, sensoriels, nutritionnels et zootechniques :

- les additifs technologiques sont toutes les substances ajoutées aux aliments pour animaux à des fins technologiques (conservateurs, antioxygènes, émulsifiants, stabilisants, épaississants, gélifiants, substances pour le contrôle de contamination de radionucléides, correcteurs d'acidité, additifs pour l'ensilage, dénaturants, anti-agglomérants et liants) ;
- les additifs sensoriels sont les substances qui, ajoutées à l'alimentation animale, améliorent ou modifient les propriétés organoleptiques des aliments pour animaux ou les caractéristiques visuelles des denrées alimentaires issues d'animaux (substances aromatiques et colorants) ;

- les additifs nutritionnels regroupent les vitamines, provitamines et substances à effet analogue chimiquement bien définies, les composés d'oligo-éléments, les acides aminés, leurs sels et produits analogues, l'urée et ses dérivés ;
- les additifs zootechniques sont tous les additifs utilisés pour influencer favorablement les performances des animaux en bonne santé ou l'environnement (améliorateurs de digestibilité, stabilisateurs de la flore intestinale, substances qui ont un effet positif sur l'environnement).

c. Teneurs maximales en contaminants

La règlementation fixe des valeurs maximales à ne pas dépasser pour deux additifs technologiques (liants et anti-agglomérants) et un additif nutritionnel (les composés d'oligo-éléments) (Tableau 14).

Les additifs appartenant au groupe fonctionnel des composés d'oligo-éléments ne peuvent pas contenir plus de 30 mg As/kg, 10 mg Cd/kg, 100 mg Pb/kg et 1 ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg et 1,5 ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg de dioxines du groupe 1 et 2 respectivement.

Il y a des exceptions pour les ETM. Les limites en As pour le sulfate de cuivre pentahydraté et carbonate de cuivre et l'oxyde de zinc, oxyde de manganèse et oxyde de cuivre sont rehaussées à 50 mg As/kg et 100 mg As/kg respectivement. Les limites en Cd pour l'oxyde de cuivre, oxyde manganeux, oxyde de zinc et sulfate manganeux monohydrate sont rehaussées à 30 mg Cd/kg. Les limites en Pb pour l'oxyde de zinc et l'oxyde manganeux, carbonate de fer et carbonate de cuivre sont rehaussées à 400 mg Pb/kg et 200 mg Pb/kg respectivement.

Les additifs appartenant au groupe fonctionnel des agents liants et antimottants ne peuvent pas contenir plus de 2 mg Cd/kg, 30 mg Pb/kg ; exception faite pour la clinoptilolite d'origine volcanique (60 mg Pb/kg). Les argiles kaolinitiques, sulfate de calcium dihydraté, vermiculite, natrolite- phonolite, aluminates de calcium synthétiques et clinoptilolite d'origine sédimentaire ne peuvent pas contenir plus de 0,75 ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg et 1,5 ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg de dioxines du groupe 1 et 2 respectivement.

Même s'ils sont dilués dans les aliments lors de leur préparation, les additifs constituent potentiellement une source importante de contamination. La Directive 2001/79/CE (Anonyme, 2001a; Anonyme., 2011a) a mis en évidence l'importance de l'évaluation de l'impact environnemental des additifs alimentaires car ils sont généralement utilisés sur une longue période de temps, potentiellement pour un grand nombre d'animaux et, la plupart du temps, libérés dans l'environnement puisqu'ils sont en grande partie excrétés. Même si le Règlement (CE) n° 1831/2003 (Anonyme, 2003c) définit l'évaluation des risques environnementaux comme une condition obligatoire dans le processus d'autorisation, aucune méthodologie précise n'existe cependant à ce jour pour calculer les concentrations de ces différentes sources de contaminants dans les différents environnements terrestres et aquatiques.

Tableau 14. Teneurs maximales en substances indésirables dans les additifs des aliments pour animaux (Annexe I du Règlement UE 574/2011 (Anonyme, 2011b)).

Additifs des aliments pour animaux	Teneur maximale en mg/kg (ppm) d'aliments pour animaux d'une teneur en humidité de 12 %				Teneur maximale en ng OMS-PCDD/F-TEQ/kg (ppt) d'aliments pour animaux d'une teneur en humidité de 12 %	
	As	Cd	Pb	Hg	PCDD/Fs	PCDD/Fs et PCB
Additifs appartenant au groupe fonctionnel des composés d'oligo-éléments	30	10	100		1	1,5
Sulfate de cuivre pentahydraté et carbonate de cuivre	50					
Oxyde de zinc, oxyde de manganèse et oxyde de cuivre	100					
Oxyde de zinc			400			
Oxyde manganeux, carbonate de fer, carbonate de cuivre			200			
Oxyde de cuivre, oxyde manganeux, oxyde de zinc et sulfate manganeux monohydrate		30				
Additifs appartenant au groupe fonctionnel des agents liants et antimottants		2	30			
Clinoptilolite d'origine volcanique			60			
Argiles kaolinitiques, sulfate de calcium dihydraté, vermiculite, natrolite- phonolite, aluminates de calcium synthétiques et clinoptilolite d'origine sédimentaire					0,75	1,5

d. Teneurs maximales en oligo-éléments dans l'aliment complet

Le Co, Cu, Mn, Mo, Se et Zn sont ajoutés en tant qu'additifs aux rations alimentaires des animaux. Cependant, ces éléments ne peuvent pas dépasser des teneurs imposées par la règlementation. Ces teneurs maximales ont été reportées dans le Tableau 15. Les teneurs maximales se trouvant ci-après sont exprimées par kg d'aliment complet c'est-à-dire une fois que l'additif a été mélangé à l'aliment.

Les aliments complets ne peuvent pas contenir plus de 2 mg Co/kg, 25 mg Cu/kg, 150 mg Mn/kg, 2,5 mg Mo/kg 0,5 mg Se/kg et 150 mg Zn/kg. Pour certaines catégories animales, les teneurs maximales sont plus élevées pour le Cu et le Zn. Les porcelets de moins de 12 semaines ne peuvent pas recevoir de ration contenant plus de 170 mg Cu/kg. Pour les autres porcs, la limite est fixée à 25 mg Cu/kg. Les bovins avant rumination ne peuvent pas recevoir de ration contenant plus de 15 mg Cu/kg. Pour les autres bovins, la limite est fixée à 35 mg Cu/kg. Les aliments d'allaitement ne peuvent pas contenir plus de 200 mg Zn/kg.

Tableau 15. Teneurs maximales en oligoéléments pouvant se trouver dans les aliments complets pour animaux (liste consolidée officieuse des additifs autorisés en Belgique ; SPF (Anonyme, 2011a)).

Catégories animales	Teneur maximale de l'élément en mg/kg d'aliment complet (12 % d'humidité)					
	Co	Cu	Mn	Mo	Se	Zn
Toutes espèces animales ou catégories d'animaux	2,0			2,5	0,50	
Aliment allaitement						200
Porcelets <12 semaines		170				
Autres porcs		25				
Bovins avant rumination		15				
Autre bovins		35				
Autres espèces		25	150			150

En 2010, l'AFSCA a réalisé au total 984 analyses sur les aliments complémentaires, aliments complets et prémélanges. Le respect des garanties et normes varie de 81 % (Zn) à 100 % (Co) des échantillons pour le Se, le Cu, le Zn et le Co (Ghafir et Coosemans, 2011). Il n'y a donc globalement pas de problème de dépassement des teneurs règlementaires en ces éléments dans les aliments.

3.3. Médicaments

3.3.1. Références règlementaires

La Directive 2001/82/CE du parlement européen et du conseil du 6 novembre 2001 instituant un code communautaire relatif aux médicaments vétérinaires (Anonyme, 2001b) définit les « médicaments vétérinaires » comme toute substance ou composition présentée comme possédant des propriétés curatives ou préventives à l'égard des maladies animales. Toute substance ou composition pouvant être administrée à l'animal en vue d'établir un diagnostic médical ou de restaurer, corriger ou modifier des fonctions physiologiques chez l'animal est également considérée comme médicament vétérinaire. La même directive définit les « aliments médicamenteux » comme tout mélange de médicament(s) vétérinaire(s) et d'aliment(s) préparé préalablement à sa mise sur le marché et destiné à être administré aux animaux sans transformation, en raison des propriétés curatives ou préventives ou des autres propriétés du médicament.

3.3.2. Médicaments les plus couramment employés

Depuis 1999, le C.B.I.P. (Centre Belge d'Information Pharmacothérapeutique) publie annuellement le Répertoire Commenté des Médicaments à Usage Vétérinaire. Tous les médicaments vétérinaires commercialisés en Belgique y sont rassemblés et commentés par classes pharmacologiques. En 2003, le chiffre d'affaires du marché belge des médicaments à usage vétérinaire se répartissait entre plusieurs catégories de substances : 24,5 % pour les médicaments anti-infectieux, 20,8 % pour les médicaments antiparasitaires, 27,1 % pour les vaccins et 27,6 % pour les autres spécialités vétérinaires (pharma.be, 2011). En élevage bovin, ce sont principalement les antimicrobiens et anti-inflammatoires qui sont employés (Théron, 2011).

3.3.3. Antimicrobiens

Les antimicrobiens comprennent les antibactériens, les antimycotiques et les antiparasitaires. Un problème majeur de la dissémination des substances antimicrobiennes – comme les antibactériens (ou antibiotiques) – dans l'environnement, est l'apparition de résistances chez les micro-organismes pathogènes.

a. Définitions règlementaires

Les définitions ci-après proviennent du règlement 1831/2003/CE (Anonyme, 2001b) :

- les « antimicrobiens » sont définis comme toute substance produite de manière synthétique ou naturelle utilisée pour détruire ou empêcher la croissance de micro-organismes tels que les bactéries, les virus ou les champignons, ainsi que des parasites, en particulier les protozoaires ;
- les «antibiotiques» sont des antimicrobiens produit par ou dérivés d'un micro-organisme, capable de détruire ou d'empêcher la croissance d'autres micro-organismes ;
- les «coccidiostatiques» et «histomonostatiques» sont des substances destinées à détruire ou à inhiber les protozoaires.

b. Types d'antimicrobiens

En Belgique, les antibactériens sont disponibles uniquement sur prescription ou délivrés par un vétérinaire (Persoons *et al.*, 2009). Au total, la consommation d'antibactériens pour les animaux d'élevage a connu une diminution de 12,8 % entre 2007 et 2009. Cela est dû à la diminution de consommation de produits pharmaceutiques antibactériens. La consommation de prémélanges médicamenteux a, quant à elle, augmenté (+ 70 %) sur la même période, mais pas suffisamment pour contrebalancer la diminution des produits pharmaceutiques (Persoons *et al.*, 2009).

Les classes d'antibactériens et les substances actives qui y sont attachées et dont l'utilisation est autorisée en Belgique sont reprises dans le Tableau 16. La substance active nommée « zinc bacitracine » a été éliminée du marché des antibactériens en 2009. La gamithromycine y a été ajoutée la même année (Persoons *et al.*, 2009).

Tableau 16. Liste des substances actives d'antibactériens regroupées par classes et dont l'utilisation est autorisée en Belgique.

Classe	Substance active	Classe	Substance active	Classe	Substance active
Aminoglycosides	Apramycine	**Macrolides**	Erythromycine	**Sulfonamides et trimethoprime**	Sulfachloropyridazine natr.
	Clindamycine		Gamithromycine		Sulfadiazine
	Dihydrostreptomycine		Lincomycine		Sulfadiméthoxine sodium
	Gentamicine		Pirlimycine		Sulfadimidine sodium
	Kanamycine		Spiramycine		Sulfadoxine
	Néomycine		Tilmicosine		Sulfaméthoxazol
	Paromomycine		Tulathromycine		Sulfanilamide
	Spectinomycine		Tylosine		Triméthoprime
Cephalosporines	Céfalexine	**Pénicillines**	Amoxicilline	**Quinolones**	Danofloxacine
	Céfalonium		Amoxicilline acide clavulanique		Difloxacine
	Céfapirine		Ampicilline		Enrofloxacine
	Céfazoline		Cloxacilline		Fluméquine
	Céfoperazon		Phénoxyméthylpénicilline		Ibafloxacine
	Céfovecin		Nafcilline		Marbofloxacine
	Cefquinome		Pénéthamate		Orbifloxacine
	Ceftiofur		Benzylpénicilline procaïne	**Autres**	Métronidazole
Amphénicols	Chloramfénicol	**Tetracyclines**	Chlortétracycline		Rifaximine
	Florfénicol		Doxycycline		Tiamuline
Polymyxines	Colistine sulfate		Oxytétracycline		Valnémuline
	Polymyxine B sulfate				Zinc bacitracine

Les données de la Figure 5 sont issues du rapport national de consommation d'antibiotiques du consortium BelVet-SAC. Il a été demandé aux 29 grossistes belges de produits pharmaceutiques antibactériens et aux 63 fabricants de prémélanges médicamenteux de transmettre leurs chiffres de ventes pour la période 2007-2009. Selon BelVet-SAC, les données recueillies sont supposées couvrir 99 % du marché belge.

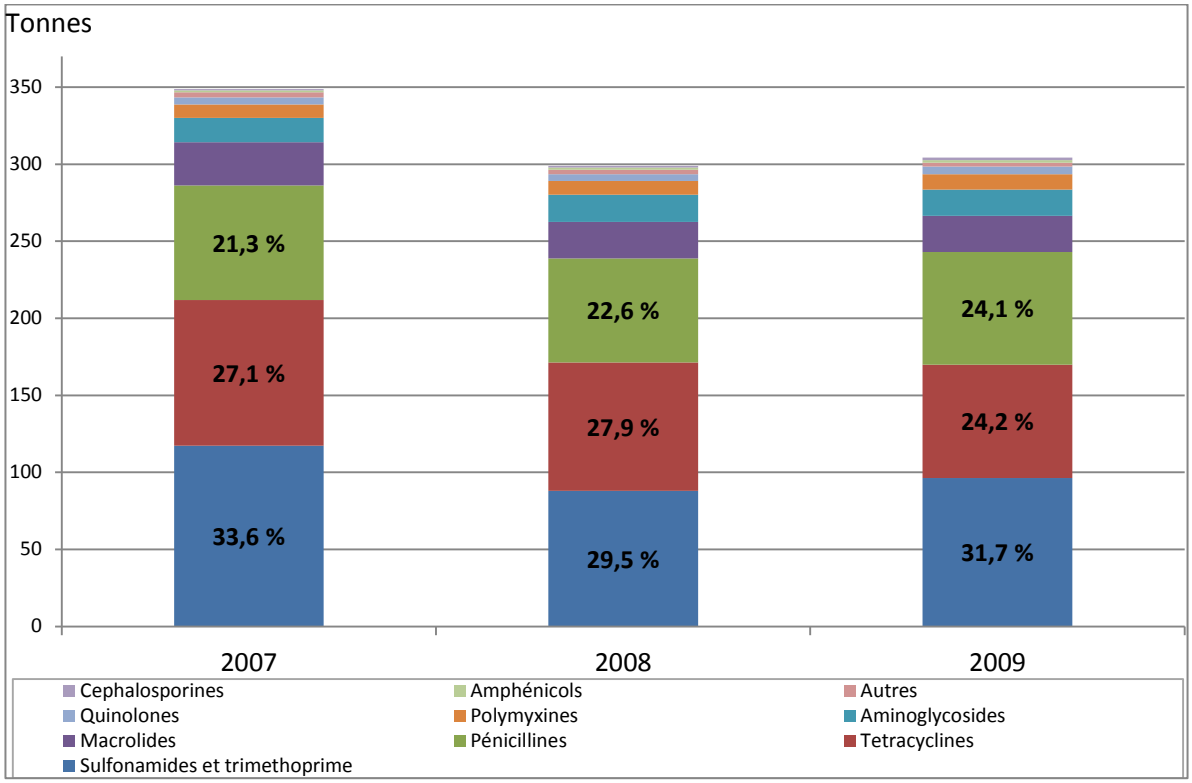

Figure 5. Consommation totale d'antibactériens, par classe d'antibactériens (Persoons *et al.*, 2009).

Il ressort de cette enquête que les trois classes de substances actives d'antibactériens les plus utilisées en Belgique sont les sulfonamides et triméthoprimes (32 %), les tétracyclines (26 %) et les pénicillines (23 %). Ces trois classes totalisent plus de 80 % des quantités commercialisées en Belgique.

Selon le rapport de BelVet-SAC, les trois matières actives les plus vendues sont la sulfadiazine (23 % ; classe : sulfonamides et triméthoprime), l'amoxicilline (19 % ; classe : pénicillines) et la doxycycline (18 % ; classe : tetracyclines). Ces trois substances totalisent un peu plus de 60 % de la quantité totale de substances antibactériennes vendues en Belgique.

3.3.4. Aliments médicamenteux

a. Définitions

La directive 2001/82/CE (Anonyme, 2001b) définit un aliment médicamenteux comme un mélange de médicament(s) vétérinaire(s) et d'aliment(s) préparé préalablement à sa mise sur le marché et destiné à être administré aux animaux sans transformation en raison des propriétés curatives ou préventives ou des autres propriétés du médicament. Un « prémélange médicamenteux » est un médicament vétérinaire préparé à l'avance en vue de la fabrication ultérieure d'aliments médicamenteux.

b. Aspects règlementaires

L'A.R. établissant les conditions de préparation, de mise sur le marché et d'utilisation des aliments médicamenteux du 21 décembre 2006 stipule les points suivants :

- les aliments médicamenteux sont exclusivement fabriqués à base de prémélanges médicamenteux pour lesquels une autorisation de mise sur le marché a été délivrée (liste disponible sur le site du SPF[5]) ;
- un seul prémélange médicamenteux peut être utilisé pour la fabrication d'un seul aliment médicamenteux, sauf dérogation ;
- l'aliment pour animaux ne contient pas comme additif le même antibiotique ou le même coccidiostatique que celui présent en tant que substance active dans les prémélanges médicamenteux utilisés ;
- la prescription des aliments médicamenteux est réalisée par le vétérinaire traitant lui-même les animaux.

En Belgique, les aliments médicamenteux ne peuvent être produits que par des firmes agréées selon les dispositions de l'arrêté royal du 21 février 2006 fixant les conditions d'agrément et d'autorisation des établissements du secteur de l'alimentation des animaux.

c. Antibactériens utilisés dans les aliments médicamenteux

La distribution de la plupart des médicaments doit se faire via les grossistes-répartiteurs, le passage par le grossiste-répartiteur pour la distribution d'aliments médicamenteux n'est cependant pas une obligation. La plupart du temps, le prémélange médicamenteux est distribué par le fabricant directement au fabricant d'aliments médicamenteux. Celui-ci va mélanger le prémélange médicamenteux à l'aliment, après quoi l'aliment médicamenteux sera distribué de l'endroit de fabrication à l'éleveur. Selon le CBIP-VET (2003), les prémélanges médicamenteux appartiennent tous au groupe des médicaments antibactériens excepté trois prémélanges qui appartiennent au groupe des antiparasitaires.

La Figure 6 reprend les 15 substances antibactériennes qui ont été utilisées au cours des années 2007, 2008 et 2009. La sulfadiazine est la plus utilisée des substances antibactériennes dans les aliments médicamenteux en Belgique (un peu moins de 43 % de la quantité totale). La doxycycline et l'oxytetracycline se trouvent en deuxième et troisième position respectivement, avec un peu plus de 11 % chacune par rapport à la quantité totale consommée.

Les prémélanges médicamenteux d'antibactériens sont presque exclusivement utilisés dans l'élevage de porcs (> 95 %). Globalement, 77,1 % des 96 analyses d'aliments médicamenteux étaient conformes aux garanties annoncées, ce qui est comparable à 2009 (Ghafir et Coosemans, 2011).

[5] http://www.beldonor.be/eportal/AnimalsandPlants/animalhealth/animalnutrition/medicatedfeedingstuffs/index.htm

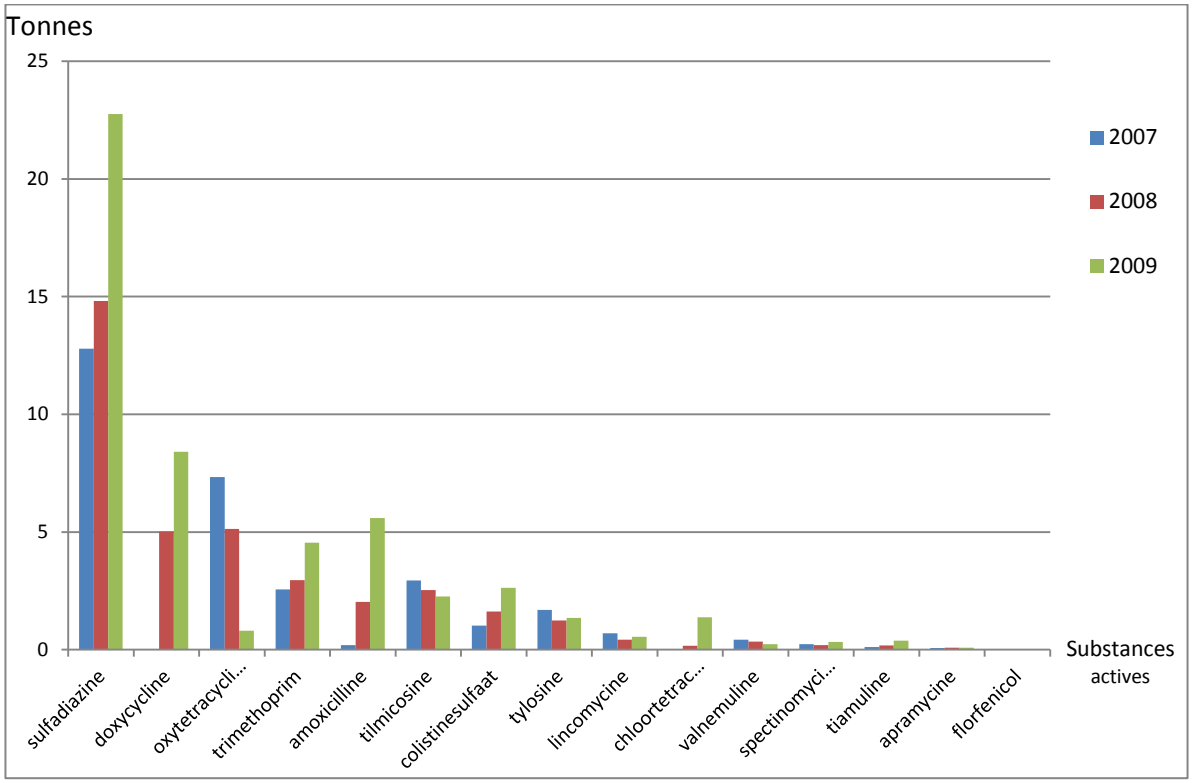

Figure 6. Consommation belge d'antibactériens pour les prémélanges médicamenteux sur la période 2007-2009 (Persoons *et al.*, 2009).

3.4. Litières de paille de céréales

Les pailles de céréales sont la partie résiduelle du battage des céréales. En France, 92 % des pailles récoltées sont utilisées comme litière pour les animaux ou pour leur alimentation. Les pailles de céréales sont composées des feuilles sénescentes et des tiges (nœuds et entrenœuds) restantes après la récolte des grains. Les pailles contiennent approximativement deux tiers de tiges et un tiers de feuilles (Ohlde *et al.* 1992 *in* (McCartney *et al.*, 2006)).

La composition de la paille et de la balle connaît d'importants écarts d'une année et d'un endroit à l'autre à cause des effets de l'environnement sur la composition botanique des résidus et l'anatomie des cellules (McCartney *et al.*, 2006).

Les tableaux 17 et 18 reprennent les teneurs courantes en oligo-élément dans les végétaux (Coïc et Coppenet, 1989).

Tableau 17. Teneur en oligo-éléments dans les végétaux (Coïc et Coppenet, 1989).

Partie végétale	Valeur	Teneurs courantes mg/kg MS					
		As	Co	Cr	Ni	Se	V
Parties aériennes	Min	0,1	0,02	0,2	0,1	0,02	0,1
	Max	5	0,05	1	3	2	10

Tableau 18. Teneur en micro-éléments indispensables aux animaux dans les végétaux (Coïc et Coppenet, 1989).

Partie végétale	Valeur	Teneurs courantes mg/kg MS			
		Cu	Mn	Mo	Zn
Végétaux (feuilles)	Min	5	50	0,1	25
	Max	15	150	1	50
Pailles de céréales	Min	3	10	0,1	10
	Max	10	100	0,3	50

Une étude canadienne (McCartney *et al.*, 2006) sur la composition des pailles a obtenu les mêmes ordres de grandeur après avoir regroupé l'information disponible dans les laboratoires provinciaux de l'ouest du Canada. Les teneurs étaient plus élevées pour le Co (de 0,4 à 1,3 mg/kg) et le Mo (de 0,3 à 1,9 mg/kg).

La quantité d'ETM absorbée par une plante est très variable. Elle dépend de l'espèce, de la variété, des propriétés naturelles du sol où la plante est cultivée ou des propriétés acquises par le sol suite aux pratiques agricoles successives (amendements, fertilisations), le pH ou l'abondance de l'ion Cl^-. Ces valeurs peuvent être comparées aux teneurs maximales en oligo-éléments dans les aliments complets pour animaux qui constituent une source potentielle de contamination beaucoup plus importante. Même si les pailles sont produites en dehors de l'exploitation, on ne peut donc pas les considérer comme des matières à risques.

3.5. Engrais de ferme (ou effluents d'élevage)

3.5.1. Définitions

L'arrêté du Gouvernement wallon du 3 mars 2005 relatif au Livre II du Code de l'environnement, contenant le Code de l'eau (Anonyme, 2005) définit le terme « effluents d'élevage » ou « effluents » comme des fertilisants organiques d'origine agricole, c'est-à-dire les déjections d'animaux ou les mélanges, quelles qu'en soient les proportions, de déjections d'animaux et d'autres composants tels que des litières, même s'ils ont subi une transformation. Parmi les effluents d'élevage, on retrouve notamment :

- le « fumier » : mélange solide de litière, d'urine et d'excréments d'animaux, à l'exclusion des effluents de volaille ;
- le « fumier mou » : fumier dont le tas constitué dans un espace libre de tout obstacle, ne peut atteindre une hauteur moyenne de plus de 65 centimètres, quelle que soit la quantité déposée. Par hauteur moyenne, on entend la hauteur du tas disposé sous forme d'andain ;
- le « lisier » : mélange de fèces et d'urines, sous forme liquide ou pâteuse ;
- le « purin » : les urines seules diluées ou non, s'écoulant des lieux d'hébergement des animaux ou de la fumière ;
- les « effluents de volaille » : les fumiers de volailles et les fientes de volailles ;
- le « fumier de volailles » : déjections de volailles mêlées à de la litière (notamment des copeaux ou de la paille) ;
- les « fientes de volailles » : déjections pures de volailles ;
- le « compost de fumier » : fumier ayant subi un traitement mécanique d'aération adéquat permettant sa décomposition aérobie; un fumier est réputé composté lorsque sa température, après s'être élevée à plus de 60 °C, est redescendue à moins de 35 °C.

Les « fientes de volailles humides » sont des fientes de volailles dont le taux de matière sèche est inférieur ou égal à 35 %.

3.5.2. Teneurs en contaminants

a. Introduction

ETM

Les engrais de ferme sont caractérisés par une grande variabilité de composition liée à la nature des spéculations, l'alimentation, les types d'atelier de production, les pratiques de conservation des engrais de ferme produits (Destain, 2011). Ils varient ainsi beaucoup dans leur teneur en macronutriments, micronutriments et métaux lourds (Bispo *et al.*, 2004), il est donc difficile de résumer en une seule valeur les teneurs en ETM.

Une première étude menée par Menzi en 1993 (Menzi et Kessler, 1998) avait déjà montré que les teneurs en ETM variaient considérablement entre les types d'engrais de ferme, les catégories animales et les fermes.

La variabilité des teneurs entre les types d'engrais de ferme est liée à l'espèce, à la race, à l'âge, à la capacité de l'animal à digérer les aliments donnés, au type de production, à l'alimentation, aux matières employées comme litière, aux conditions climatiques durant la production d'engrais de ferme, au type de ferme (Gendebien *et al.*, 2001; Bispo *et al.*, 2004; Anonyme, 2008).

Menzi *et al.* (1998) ont réalisé une étude portant sur près de 1100 échantillons visant à évaluer l'importance des charges d'ETM dans les engrais de ferme en Suisse. Il en ressort que la gamme des teneurs en ETM est large pour toutes les catégories animales, les types de matières et les éléments considérés. Ces différences sont expliquées par le contenu des rations alimentaires des animaux. La distribution des valeurs observées montre une très grande dissymétrie qui se traduit par des valeurs extrêmes parfois très élevées par rapport à la médiane (les valeurs maximales peuvent être jusque 10 fois supérieures aux valeurs médianes). Ces valeurs extrêmes sont vraisemblablement liées à des teneurs plus élevées dans l'alimentation. Les gammes de valeurs les plus larges ont été enregistrées pour le Pb. Cela est expliqué par des différences régionales des dépôts atmosphériques en Pb sur les pâtures.

Le Cu et Zn ne sont pas facilement assimilables par les animaux et sont fournis en plus grande quantité. Ces deux éléments se retrouvent donc dans les engrais de ferme dans des concentrations assez importantes. Les engrais de ferme contiennent d'autres ETM mais en quantités plus faibles (ADEME, 2007).

Selon Adiano *et al.* (2004), les engrais de ferme sont une source majeure d'As. L'As a été utilisé en tant qu'additif alimentaire pour contrôler les maladies et améliorer le gain de poids des porcs et des volailles. L'As en tant qu'additif a été abandonné en Europe mais est toujours employé dans certains pays comme les USA et la Chine (Li et Chen, 2005).

Sager (2007) a observé des teneurs en Ba, en Be, en Li, en Sr et en V très faibles. La plupart des matières fécales avaient des teneurs de 10 mg V/kg.

Nicholson *et al.* (1999) ont prélevé 183 échantillons d'aliments pour animaux et 85 d'engrais de ferme à partir de fermes commerciales anglaises et galloises et les ont analysées pour déterminer leur teneur en ETM (Zn, Cu, Ni, Pb, Cd, As, Cr et Hg). Dans leur étude, les concentrations en Hg dans les aliments ne dépassaient pas 0,10 mg/kg pour presque tous les échantillons et les concentrations dans les engrais de ferme étaient inférieures à 0,05 mg/kg pour tous les échantillons.

CTO

Les animaux peuvent être exposés à différentes substances organiques comme les résidus de polluants organiques dans les aliments et les médicaments (Bell *et al.*, 1983). Un grand nombre de substances chimiques industrielles peuvent se retrouver dans l'alimentation des animaux par erreur de manipulation ou par dépôt atmosphérique sur les cultures (Bell *et al.*, 1983).

Les engrais de ferme appliqués sur les sols peuvent ainsi mener à une accumulation de CTO potentiellement toxiques (PCB, HAP, phénols, dioxines, médicaments, etc.) (Bispo *et al.*, 2004; Anonyme, 2008).

Actuellement, peu d'information sur les teneurs en CTO dans les engrais de ferme se trouvent dans la littérature.

b. Excréments de bovins

ETM

Le Tableau 19 reprend les teneurs minimales et maximales en ETM qui ont été rencontrées dans la littérature pour les excréments de bovins. Comme mentionné précédemment, les teneurs en Cu et Zn peuvent être relativement élevées, jusque 352 et 1100 mg/kg MS respectivement.

Nicholson *et al.* (1999) ont obtenu des teneurs en Zn et Cu généralement supérieures dans les excréments de bovins laitiers par rapport aux teneurs des bovins viandeux (180 mg Zn/kg MS et 50 mg Cu/kg MS et 110 mg Zn/kg MS et 25 mg Cu/kg MS respectivement). Ces différences sont probablement dues aux suppléments minéraux ajoutés pour les bovins laitiers, enrichis en Zn et Cu.

Les autres additifs que sont le Co, le Mo et le Se se trouvent à des concentrations maximales respectives de 2,1, 3,5 et 0,84 mg/kg MS.

Considérés comme substances indésirables dans les aliments pour animaux, l'As, le Cd, le Hg et le Pb, se trouvent dans les excréments de bovins à des concentrations pouvant atteindre 10,8, 3,2, 0,17 et 50 mg/kg MS respectivement.

L'étude menée par Menzi *et al.* (1998) a mis en évidence des teneurs en Pb et en Cd supérieures dans les excréments de bovins par rapport à des excréments de volailles et de porcs. Cette différence est expliquée par l'alimentation. Les rations des bovins comprenant une grande part d'herbe qui peut être contaminée par les apports atmosphériques de Cd et de Pb.

Le Ba, Be, Cr, Li, Ni, Sr et V ne se trouvent pas dans la législation des aliments pour animaux mais se retrouvent dans les excréments de bovins.

Ces éléments sont généralement moins étudiés dans les engrais de ferme. Il serait donc intéressant de leur porter une attention particulière.

Tableau 19. Teneurs en ETM rencontrées dans la littérature pour les excréments de bovins.

		Teneur (mg/kg MS)															
		As	**Ba**	**Be**	**Cd**	**Co**	**Cr**	**Cu**	**Hg**	**Li**	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Se**	**Sr**	**V**	**Zn**
Bovins	MIN	0,050	46	0,16	0,040	0,70	0,10	0,50	0,025	3,2	3,5	0,10	0,090	0,12	59	2,9	2,5
	MAX	10,8	46	0,16	3,2	2,1	21	352	0,17	3,2	3,5	20	50	0,84	59	2,9	1100

Différentes études montrent que les lisiers de bovins tendent à être plus concentrés en ETM que les fumiers (Chambers *et al.*, 1998; Menzi *et al.*, 1998; Nicholson *et al.*, 1999; Gendebien *et al.*, 2001). Cela est expliqué par Menzi et Kessler (1998) par une dilution de la concentration dans les excréments solides par l'ajout de pailles.

Les résultats obtenus par Nicholson *et al.* (1999) (85 échantillons d'engrais de ferme anglaises et galloises) nous montrent, dans le Tableau 20, que les teneurs moyennes en ETM dans les excréments de bovins sont généralement supérieures pour les lisiers. Exception faite pour l'As et le Cd pour les bovins laitiers où la tendance s'inverse légèrement. Pour l'Hg, la valeur correspond à la moitié de la limite de détection.

Le fumier de bovins laitiers contient généralement plus d'ETM que le fumier de bovins à l'engraissement. Cette différence se marque uniquement pour le Cu et le Zn dans les lisiers.

Tableau 20. Teneurs moyennes en ETM dans différents excréments de bovins (Nicholson *et al.*, 1999).

	Teneur moyenne (mg/kg MS)							
	As	**Cd**	**Cr**	**Cu**	**Hg**	**Ni**	**Pb**	**Zn**
Fumiers de bovins laitier	1,6	0,38	5,3	38	0,025	3,7	3,6	153
Fumiers de bovins à l'engraissement	0,79	0,13	1,4	16	0,025	2,0	2,0	81
Lisiers de bovins laitier	1,4	0,33	5,6	62	0,025	5,4	5,9	209
Lisiers de bovins à l'engraissement	2,6	0,26	4,7	33	0,025	6,4	7,1	133

☞ ***En conclusion,*** *les teneurs maximales pour le Cd, Cr, Cu, Hg, Pb, Ni et Zn dans les excréments de bovins trouvées dans la littérature ne dépassent pas les limites de la sous-classe B2 imposées par la Région wallonne pour la valorisation des matières recyclables (Tableau 21).*

Tableau 21. Valeurs limites des teneurs en ETM autorisées dans les matières recyclables en Région wallonne (AGW 12/01/1995, Ghysel, 2011).

Elément	Teneurs mg/kg MS	
	B1	**B2**
As	20	
Cd	1,5	5
Cr	100	500
Cu	100	600
Hg	1	5
Pb	100	500
Ni	50	100
Zn	400	2000

CTO

Il existe peu de données sur les contaminants organiques se trouvant dans les engrais de ferme.

Diercxsens *et al.* (1987) *in* (Bispo *et al.*, 2004) ont estimé la contribution des fumiers et des lisiers sur la contamination des sols avec les HAP et les PCB en Suisse. Ils ont trouvé que la contribution des engrais de ferme pour les PCB est de 17 % et pour les HAP de 6 à 17 % en fonction de la proximité des sols par rapport aux zones urbaines ou industrielles.

En 1997, l'Agence Danoise de Protection de l'Environnement (DEPA) a mené une étude sur l'utilisation des matières recyclables en agriculture. Au cours de cette étude, deux échantillons de lisier de bovins ont été prélevés pour y analyser les composés organiques xénobiotiques. Un échantillon était issu d'une ferme pratiquant de l'élevage « bio » et un autre échantillon était issu de l'élevage conventionnel. Les composés pour lesquels une valeur supérieure au seuil de détection ont été observés dans les lisiers de bovins sont regroupés dans le Tableau 22. Les résultats ont été convertis en kg MS sur base du taux de MS dans les lisiers.

Hormis les nonylphénols et les phthalates, les substances détectées se trouvent à des concentrations très faibles, avoisinant les limites de détection (Torslov *et al.*, 1997).

Tableau 22. Composés traces organiques dans l'extrait aqueux de lisiers de bovins (Torslov *et al.*, 1997) ; « - » signifie teneur sous la limite de détection.

Groupe	Composé organique	Teneur (µg/l)		Teneur (µg/kg MS)	
		Lisier de bovins	Lisier de bovins (bio)	Lisier de bovins	Lisier de bovins (bio)
HAP	Naphthalène	0,25	3,5	4,1	85
	Trimethylnaphthalenes (C3)	5	1,3	82	32
	Phenanthrene	0,04	0,13	0,66	3,2
	Benzo(a)pyrene	0,51	0,45	8,4	11
Phénols	Phenol	0,24	0,72	3,9	18
	3,4-methylphenol	4,4	17	72	415
	2,4-methylphenol	-	0,55	-	13
	Nonylphenol (+ethoxylates)	64	45	1049	1098
Plastifiants	Di-n-butylphthalate (DBP)	25	2,5	410	61
	Butylbenzylphthalate	3,1	-	51	-
	Di(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP)	281	244	4607	5951
	Diethylphthalate	2,3	2	38	49
	Di-n-octylphthalate	10	4,5	164	110
Phosphates triesters	Tri-n-butylphosphate	0,16	0,17	2,6	4,1
	Triphenylphosphate	4,5	1,6	74	39
	Tricresylphosphate	2,3	11	38	268
	Cis- and trans-isosafrol	1,4	1,5	23	37
	LAS	6	16	98	390

Une étude suisse (Berset et Holzer, 1995) sur les micropolluants organiques (HAP et PCB) dans l'agriculture suisse a quantifié les teneurs en PAH et PCB dans les lisiers de bovins et de porcs. Pour les lisiers de bovins, ils ont trouvé des teneurs moyennes de 165 µg HAP/kg MS (de 87 à 309 µg HAP/kg MS) et de 20 µg PCB/kg MS (de 9,8 à 30,4 µg PCB/kg MS).

Stevens et Jones (2003) ont mené une étude sur le contenu en PCDD/F dans les engrais de ferme en Grande Bretagne. Ils ont trouvé des teneurs moyennes en PCDD/F dans les exréments de bovins de 3,6 ng I-TEQ/kg MS.

Dumortier (2011) a mesuré, dans les excréments de bovins, des teneurs médianes d'environ 4 ng PCDD/F BEQ/kg MS et d'environ 0,5 ng DL-PCB BEQ/kg MS. Les DL-PCB correspondent aux polychlorobiphényles similaires aux dioxines. Les mesures par GC-MS donnent des teneurs médianes d'environ 0,6 ng TEQ/kg MS.

Les médicaments vétérinaires sont utilisés largement en Europe pour soigner les animaux d'élevage. Une fois administrés (oralement ou par injection), les médicaments peuvent être absorbés et partiellement métabolisés avant d'être excrétés dans les urines et les matières fécales (Halling-Serensen *et al.*, 1998; Bispo *et al.*, 2004).

Beaucoup d'antibiotiques utilisés dans l'alimentation sont très faiblement absorbés dans l'intestin des animaux avec comme résultat une excrétion de 30 à 90 % des composés via les matières fécales et les urines (Alcock *et al.*, 1999). La quantité excrétée varie avec le type d'antibiotique, le dosage, l'espèce et l'âge de l'animal (Katz, 1980 *in* (Zhao *et al.*, 2010)).

Zhao *et al.* (2010) ont réalisé une étude sur les résidus d'antibiotiques dans les matières fécales de bovins, porcs et volailles dans 8 provinces chinoises. Pour les bovins (28 échantillons), ils ont trouvé de la ciprofloxacine (jusqu'à 29,6 mg/kg), de l'enrofloxacine (jusqu'à 46,7 mg/kg), de l'oxytétracycline (jusqu'à 59,6 mg/kg), de la chlortétracycline (jusqu'à 27,6 mg/kg). Les sulfonamides sont présentes en quantités moins élevées (moins de 10 mg/kg).

Parmi ces composés médicamenteux, seule la ciprofloxacine n'est pas employée en Belgique.

L'enrofloxacine et la chlortetracycline étaient très souvent détectées dans les matières fécales des animaux. Pour la plupart des antibiotiques, les niveaux de résidus varient de manière significative entre les districts et les espèces animales (Zhao *et al.*, 2010).

☞ ***En conclusion,*** *les teneurs en HAP, DEHP et LAS rapportées par l'étude DEPA (1997) et les teneurs en HAP et PCB dans l'étude de Berzet et Holzer (1995) ne dépassent pas les limites de classe B2 et B1 utilisées pour l'autorisation de valorisation des déchets recyclables en agriculture en Région wallonne (Tableau 23).*

Aucune norme ni valeur de référence n'existe pour les teneurs en médicaments dans les excréments de bovins.

Tableau 23. Valeurs limites des teneurs en ETM autorisées dans les matières recyclables en Région wallonne (Ghysel, 2011).

Composé organique	Teneurs maximale (mg/kg MS)	
	B1	B2
HAP totaux	5	10
PCB totaux	0,15	0,5
DEHP	50	
LAS	1500	

c. Excréments de porcs

ETM

Un rapport de la FAO et une étude menée par Menzi *et al.* (1993) suggéraient qu'il fallait s'attendre à avoir les teneurs en ETM les plus importantes dans les excréments de porcs. Les teneurs en Cu et en Zn sont supérieures dans les excréments de porcs (particulièrement pour les porcs à l'engrais et les porcelets) par rapport aux excréments de bovins et de volailles (Li et Chen, 2005; Li *et al.*, 2007). Dans l'élevage des porcs, le Cu et le Zn sont utilisés pour augmenter les performances (agent antibactérien intestinal et stimulation de la croissance). Ils sont utilisés chez les porcelets sevrés pour contrôler les diarrhées post-sevrage (Steinfeld *et al.*, 2006) et se retrouvent principalement dans leurs excréments (Menzi et Kessler, 1998).

Les besoins minima en Cu dans l'alimentation varient entre 5 et 10 mg/kg mais des teneurs plus élevées favorisent la croissance. Les teneurs en Cu dans les matières fécales sont environ 5 fois plus importantes que dans les aliments (Li et Chen, 2005).

Le Tableau 24 reprend les teneurs minimales et maximales en ETM qui ont été rencontrées dans la littérature pour les excréments de porcs. Les teneurs maximales en Cu et en Zn sont, comme pour les bovins, plus élevées que les autres ETM, jusque 2017 et 5832 mg/kg MS respectivement. La teneur maximale en Cu provient d'une étude chinoise de Xiong *et al.* (2010) et la teneur maximale en Zn est issue d'une étude suisse de Menzi et Kessler (1998). Les teneurs maximales en ces deux éléments sont plus élevées que pour les excréments de bovins (Tableau 19).

Les autres additifs qui sont le Co, le Mo et le Se se retrouvent à des concentrations maximales respectives de 4, 5,3 et 3,57 mg/kg MS. Ces trois teneurs sont elles aussi plus élevées que celles des bovins.

L'As, le Cd, l'Hg et le Pb, se trouvent dans les excréments de porcs à des concentrations pouvant atteindre 6,7, 1,3, 0,025 et 23,9 mg/kg MS respectivement. Dans ce cas, les teneurs sont toutes plus faibles que pour les bovins.

Le Ba, le Be, le Cr, le Li, le Ni, le Sr et le V se trouvent à des teneurs maximales respectives de 42, 0,16, 24, 3,5, 49,8, 53 et 6 mg/kg MS. Les teneurs sont toutes similaires aux excréments de bovins hormis pour le Ni et le V qui se trouvent à des concentrations environ deux fois supérieures dans les excréments de porcs. Une étude menée par Sager (2007) a obtenu des teneurs médianes en Ni supérieures pour les excréments de porcs par rapport aux autres espèces animales (Sager, 2007).

Tableau 24. Teneurs en ETM rencontrées dans la littérature pour les excréments de porcs.

		Teneur (mg/kg MS)															
		As	**Ba**	**Be**	**Cd**	**Co**	**Cr**	**Cu**	**Hg**	**Li**	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Se**	**Sr**	**V**	**Zn**
Porcs	MIN	0,050	24	0,16	0,040	2,3	0,10	0,50	0,025	1,4	2,1	0,050	0,20	1,1	47	4,2	2,5
	MAX	6,7	42	0,16	1,3	4,0	24	2017	0,025	3,5	5,3	50	24	3,6	53	6	5832

Comme pour les bovins, des études montrent que les lisiers de porcs tendent à être plus concentrés en ETM que les fumiers (Chambers *et al.*, 1998; Menzi *et al.*, 1998; Nicholson *et al.*, 1999; Gendebien *et al.*, 2001).

Le Tableau 25 illustre cette affirmation principalement pour l'As, le Cr, le Ni et le Zn. Pour le Cd, le Cu et le Pb, la tendance se marque moins, cependant, les teneurs maximales rencontrées pour ces trois éléments dans les échantillons de lisier de porcs sont supérieures à celles rencontrées pour les fumiers de porcs.

Tableau 25. Teneurs moyennes en ETM dans les fumiers et lisiers de porcs (Nicholson *et al.*, 1999).

	Teneur (mg/kg MS)							
	As	**Cd**	**Cr**	**Cu**	**Hg**	**Ni**	**Pb**	**Zn**
Fumier de porcs	0,90	0,37	2,0	374	0,025	7,5	2,9	431
Lisier de porcs	1,7	0,30	2,8	351	0,025	10,4	2,5	575

☞ ***En conclusion,*** *les teneurs maximales pour le Cd, le Cr, le Hg, le Pb et le Ni dans les excréments de bovins trouvées dans la littérature ne dépassent pas les limites de la sous-classe B2 imposées par la Région wallonne pour la valorisation des matières recyclables (Tableau 21).*

Cependant, pour le Cu et Zn les limites maximales imposées (fixées respectivement à 600 et 2000 mg/kg MS) sont largement dépassées (2017 et 5832 mg/kg MS respectivement).

CTO

Stevens et Jones (2003) ont trouvé des teneurs moyennes en PCDD/F dans les excréments de porcs de 0,19 ng I-TEQ/kg MS.

Pour les excréments de porcs, Dumortier (2011) a obtenu des valeurs médianes d'environ 7 ng PCDD/F BEQ/kg MS et d'environ 0,2 ng DL-PCB BEQ/kg MS. Les mesures par GC-MS donnent des valeurs médianes d'environ 0,1 ng TEQ/kg MS.

Berset et Holzer (1995) ont trouvé des teneurs moyennes de 143 µg HAP/kg MS (de 66–339 µg HAP/kg MS) et de 37 µg PCB/kg MS dans les lisiers de porcs.

Dans une étude allemande (Fromme *et al.*, 2002), des niveaux de BPA (bisphénol A) variant entre 61,1 et 1112 µg/kg MS ont été trouvé dans les excréments liquides de porcs et de bovins. Aucune différence n'a été mise en évidence entre ces deux espèces animales.

Les BPF (bisphénol F) étaient présents à des niveaux significativement inférieurs à ceux des BPA. Ces composés sont en effet actuellement moins utilisés que les BPA. Les teneurs dans 3 échantillons sur 10 variaient de 2,2 jusqu'à 62,6 µg/kg MS.

Les niveaux de DEHP (di(2-ethylhexyl)phthalate) et DBP (dibutylphthalate) dans les engrais de ferme (bovins et porcs) variaient entre 0,41 et plus de 5,3 mg/kg MS et entre 0,05 et 2,97 mg/kg MS respectivement.

Une sourc8 re V*A2EMC qv4e

3.5.3. Tendances et évolution

Entre 1990 et 1995, les teneurs médianes en Cu, Zn, Pb et Cd dans les matières fécales des animaux d'élevage ont diminué de 28, 17, 49 et 56 % respectivement. Cela est expliqué par les mesures de protection de l'air mises en place pour le Pb et Cd et par la limitation des apports en ETM dans les rations à un niveau correspondant mieux aux besoins des animaux (Menzi et Kessler, 1998).

Cependant, Sager (2007) montre une tendance inverse pour les teneurs dans les matières fécales de porcs et volaille entre 1992-1993 et 2003-2005. Le Cu et le Zn montrent une tendance à l'augmentation tandis que le Pb, le Cr et le Ni restent environ au même niveau, le Cd a cependant tendance à diminuer.

3.6. Conclusion pour les engrais de ferme

3.6.1. ETM

Les teneurs en ETM (As, Cd, Hg et Pb) et composés dioxiniques sont surveillées dans les aliments pour animaux. Ce sont des substances indésirables, aucun acteur de la filière de production ne cherche donc à avoir ces substances présentes dans les aliments. Les additifs (Co, Cu, Mn, Mo, Se et Zn) sont, eux, ajoutés de manière volontaire pour favoriser les performances des systèmes d'élevage. Dans ce cas, les valeurs maximales fixées sont très probablement proches de la réalité, voire même dépassées dans certaines situations.

Dans ces deux cas, les teneurs maximales admises dans les aliments pour animaux sont fixées pour limiter les risques pour la sécurité de la chaîne alimentaire. Dans le cadre de cette étude, il faut cependant prendre en considération que les teneurs en contaminants dans les excréments sont supérieures à celles des aliments. Cang et *al.* (2004) ont trouvé des teneurs en Zn dans les excréments de 1 à 6,6 fois supérieures à celles des aliments. Le facteur multiplicatif était de 2,7 pour les volailles et 3,5 pour les porcs. Ces facteurs multiplicatifs sont donc fonction de la catégorie animale. Les teneurs en Ni, Ba, Co, Mo, Sr, Ti, Pb, Cd, Cr, As et Hg dans les engrais de ferme étaient plus concentrées que dans les aliments (1-3 fois pour le Pb, 2-4 fois pour le Cd et 2-10 fois pour le Cr). Pour des ETM comme le Co, le Cu, le Mo, le Se ou le Zn, il faut donc s'attendre à en retrouver dans des quantités appréciables dans les excréments d'animaux (Cang *et al.*, 2004).

Dans tous les excréments d'animaux d'élevage se trouvent des quantités plus ou moins élevées d'ETM. Les teneurs les plus importantes se trouvant dans les lisiers.

Les teneurs en ETM peuvent varier fortement. Dans tous les cas, les teneurs maximales ne dépassent pas les limites fixées par la législation wallonne en ce qui concerne la valorisation des déchets recyclables sauf pour les excréments de porc qui dépassent largement la limite pour le Cu et Zn. Ces deux éléments méritent donc une attention particulière, chez les porcs du moins.

Le Co et le Mo se trouvent dans les excréments des trois espèces animales et pour le Co, plus particulièrement chez les porcs. Le Se se retrouve principalement chez les porcs et volailles.

L'As, le Cd, l'Hg et le Pb se retrouvent dans tous les excréments ; l'As plutôt dans les excréments de volailles et le Pb plutôt dans les excréments de bovins. Il faut noter que l'Hg se retrouve en très faibles quantités dans les excréments avec des valeurs souvent inférieures à la limite de détection.

Les excréments de volailles contiennent plus de Cr. Les excréments de porc, plus de Ni.

D'autres ETM, moins souvent étudiés comme le Ba, le Be, le Li, le Sr et le V sont mentionnés dans la littérature. Les teneurs sont similaires entre les excréments des différentes espèces animales hormis pour le V qui se trouve en quantités supérieures chez les volailles. Il serait donc intéressant d'investiguer plus particulièrement ces éléments.

3.6.2. CTO

Le peu de données pour les CTO, montre que les lisiers de bovins peuvent contenir des HAP, des phénols, des plastifiants (phtalates) et des phosphates diesters. Parmi ceux-ci, les nonylphénols et les phtalates se trouvent en quantité plus importante et présentent donc une contamination potentielle plus grande.

Les PCB ont été identifiés dans les lisiers de porcs et bovins. Cependant, pour ces composés, les normes existantes pour les matières recyclables en agriculture en Région wallonne ne sont pas dépassées. Ces composés ne représentent donc pas, *a priori*, un danger de contamination supérieur.

Les engrais de ferme contiennent aussi des dioxines, ceux de bovins étant plus riches en PCDD/F que ceux des porcs et des volailles, pour lesquels les teneurs sont similaires.

En ce qui concerne les substances médicamenteuses, qu'elles soient administrées oralement ou par injection, une grande partie des substances actives se retrouvent dans les matières fécales. Un grand nombre de substances peuvent donc potentiellement se retrouver dans les excréments d'animaux. Certains groupes de substances médicamenteuses sont plus utilisées comme les antibiotiques. Parmi ceux-ci, la sulfadiazine, l'amoxicilline et la doxycycline sont utilisées en quantités plus élevées. Il serait donc intéressant de les suivre plus particulièrement. En effet, ces substances médicamenteuses peuvent être résistantes à la dégradation (cas de la tétracycline et oléandomycine dans l'étude de Hamscher *et al.* (2000)) et avoir un impact sur l'environnement et potentiellement sur la santé humaine et sur les animaux de par l'apparition de résistances aux antibiotiques chez les micro-organismes pathogènes (Huysman *et al.*, 1993 *in* (Bispo *et al.*, 2004)).

4. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

4.1. Documents

ADEME (2007). Bilan des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles de France Métropolitaine. Bilan qualitatif de la contamination par les éléments tracés métalliques et les composés tracés organiques et application quantitative pour les éléments tracés métalliques. Angers, France, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). Rapport final. 329 pp.

Adriano, D.C., Bolan, N.S., Vangronsveld, J. et Wenzel, W.W. (2004). Heavy metals. In: Encyclopedia of soils in the environment, Hillel, D., Rosenzweig, C., Powlson, D.et al. Academic Press, vol. 2, 175-181.

Alcock, R.E., Sweetman, A. et Jones, K.C. (1999). Assessment of organic contaminant fate in waste water treatment plants. I. Selected compounds and physicochemical properties. Chemosphere **38** (10), 2247-2262.

Anonyme (1999a). Background Report on Fertilizer Use, Contaminants and Regulations. 110 pp + 66 pp.

Anonyme (1999b). Estimating risk from contaminants contained in agricultural fertilizers. Office of Solid Waste (Washington), Center for Environmental Analysis. Draft Report. 1-1 - 10-10.

Anonyme (2000). DIRECTIVE 2000/60/CE DU PARLEMENT EUROPEEN ET DU CONSEIL du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. L 327/1 - L 327/72.

Anonyme (2001a). DIRECTIVE 2001/79/CE DE LA COMMISSION du 17 septembre 2001 modifiant la directive 87/153/CEE du Conseil portant fixation de lignes directrices pour l'évaluation des additifs dans l'alimentation des animaux. L 267/1 - L 267/26.

Anonyme (2001b). DIRECTIVE 2001/82/CE DU PARLEMENT EUROPEEN ET DU CONSEIL du 6 novembre 2001 instituant un code communautaire relatif aux médicaments vétérinaires. L 311/1-L 311/66.

Anonyme (2002a). DIRECTIVE 2002/32/CE DU PARLEMENT EUROPEEN ET DU CONSEIL du 7 mai 2002 sur les substances indésirables dans les aliments pour animaux. L 140/10 - L 140-21.

Anonyme (2002b). REGLEMENT (CE) N° 178/2002 DU PARLEMENT EUROPEEN ET DU CONSEIL du 28 janvier 2002 établissant les principes généraux et les prescriptions générales de la législation alimentaire, instituant l'Autorité européenne de sécurité des aliments et fixant des procédures relatives à la sécurité des denrées alimentaires. L 31/1 - L 31/24.

Anonyme (2003a). Guide d'élaboration du dossier technique concernant les matières fertilisantes ou les supports de culture candidats à l'inscription dans une norme française existante ou à créer. Norme AFNOR U44A N 34. Saint-Denis La Plaine, France.

Anonyme (2003b). REGLEMENT (CE) n°2003/2003 DU PARLEMENT EUROPEEN ET DU CONSEIL du 13 octobre 2003 relatif aux engrais. L 304/1 - L304/194.

Anonyme (2003c). REGLEMENT (CE) N° 1831/2003 DU PARLEMENT EUROPEEN ET DU CONSEIL du 22 septembre 2003 relatif aux additifs destinés à l'alimentation des animaux. L 268/29 - L 268/43.

Anonyme (2005). Arrêté du Gouvernement wallon relatif au Livre II du Code de l'environnement, contenant le Code de l'eau. Consolidation officieuse. 78 pp.

Anonyme (2008). Encyclopedia of Soil Science. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Chesworth, W. (ed.). Dordrecht, The Netherlands, Springer. 849 pp.

Anonyme (2009). REGLEMENT (CE) N°767/2009 DU PARLEMENT EUROPEEN ET DU CONSEIL du 13 juillet 2009 concernant la mise sur le marché et l'utilisation des aliments pour animaux, modifiant le règlement (CE) n°1831/2003 du Parlement européen et du Conseil et abrogeant la directive 79/373/CEE du Conseil, la directive 80/511/CEE de la Commission, les directives 82/471/CEE, 83/228/CEE, 93/74/CEE, 93/113/CE et 96/25/CE du Conseil, ainsi que la décision 2004/217/CE de la Commission. L 229/1-L 229/28.

Anonyme (2010). REGLEMENT (UE) n° 242/2010 de la COMMISSION du 19 mars 2010 portant création du catalogue des matières premières pour aliments des animaux. L 77/17-L 77/32.

Anonyme (2011a). Additifs. Bruxelles, Belgique, DG Animaux, Végétaux et Alimentation. 3 pp.

Anonyme (2011b). REGLEMENT (UE) N° 574/2011 DE LA COMMISSION du 16 juin 2011 modifiant l'annexe I de la directive 2002/32/CE du Parlement européen et du Conseil en ce qui concerne les teneurs maximales applicables au nitrite, à la mélamine, à Ambrosia spp. et au transfert de certains coccidiostatiques et histomonostatiques, et établissant une version consolidée de ses annexes I et II. L 159/7 - L 15/24.

Anonyme. (2011a). L'usage de prémélanges médicamenteux et la délivrance d'aliments médicamenteux pour animaux. 1 p.

Anonyme. (2011b). Produits potassiques. Extraction, traitements et vente en Suisse. Berne, Suisse, KALI AG, Potasse SA. 9 pp.

Baize, D. et Tercé, M. (2002). Un point sur ... les éléments traces métalliques dans les sols. Approches fonctionnelles et spatiales. Editions, INRA. 565 pp.

Bell, R.G., Frank, R., MacLean, A.J., McQuitty, J.B., Miller, M.H., Robinson, J.B., Smith, H.J., Sutton, M.D., Webber, L.R. et Webber, M.D. (1983). Farm animal manures in the canadian environment. National Research Council of Canada. 135 pp.

Berset, J.D. et Holzer, R. (1995). Organic Micropollutants in Swiss Agriculture : Distribution of Polynuclear Aromatic Hydrocarbons (PAH) and Polychlorinated Biphenyls (PCB) in Soil, Liquid Manure, Sewage Sludge and Compost Samples ; a Comparative Study. Int. J. Environ. Anal. Chem. **59** (2-4), 145-165.

Bispo, A., Schubetzer, C. et Feix, I. (2004). Contribution of manure and slurry to soil diffuse pollution. 20 pp.

Cang, L., Wang, Y.J., Zhou, D.M. et Dong, Y.H. (2004). Heavy metals pollution in poultry and livestock feeds and manures under intensive farming in Jiangsu Province, China. J. Environ. Sci. **16** (3), 371-374.

Chambers, B.J., Nicholson, F.A., Soloman, D.R. et Unwin, R.J. (1998). Heavy metal loadings from animal manures to agricultural land in England and Wales. Proc. of the International Conference on Management Strategies for Organic Waste Use in Agriculture, Sess. 8 (RAMIRAN 98), Rennes, France, 26-29 May 1998, 475-483.

Coïc, Y. et Coppenet, M. (1989). Les Oligo-éléments en agriculture et élevage : incidences sur la nutrition humaine. Editions, Quae. INRA, 122 pp.

CSHPF (1998). Risques sanitaires liés aux boues d'épuration des eaux usées urbaines. Paris: Tec et Doc, 107.

da Silva, E.F., Mlayah, A., Gomes, C., Noronha, F., Charef, A., Sequeira, C., Esteves, V. et Figueiredo Marques, A.R. (2010). Heavy elements in the phosphorite from Kalaat Khasba mine (North-western Tunisia) : Potential implications on the environment and human health. J. Hazardous Mater. **182**, 232-245.

Dautrebande, S. et Sohier, C. (2006). La contamination diffuse des sols en Région Wallonne. Gembloux, Faculté universitaire des sciences agronomiques, Hydrologie & Hydraulique Agricole (UHAGx), Génie Rural & Environnemental. Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallon. 131 pp.

Destain, J.P. (2011). Matières fertilisantes. Gembloux, Belgique, FUSAGx. Cours, 98 pp.

Dumortier, P., Pussemier, L., Elskens, M. et Goeyens, L. (2011). Quantification of dioxin compounds in fertilisers, soil conditioners and sewage sludge intended for use in agricultural soils. Bruxelles, Tervuren, CODA-CERVA. Rapport final. 100 pp.

Erdem, E., Tinkilic, N., Yilmaz, V.T., Uyanik, A. et Ölmez, H. (1996). Distribution of uranium in the production of triple superphosphate (TSP) fertilizer and phosphoric acid. Fert. Res. **44**, 129-131.

FAO (2004). Utilisation des phosphates naturels pour une agriculture durable. 79-85.

Foth, H.D. (1990). Fundamentals of soil science. John Wiley & Sons, 353 pp.

Fouchécourt, M.O. et Beausoleil, M. (2001). Evaluation des impacts à long terme de l'utilisation agricole de matières résiduelles fertilisantes au Québec. Mise en contexte et risques à la santé associés à l'apport de cadmium et de dioxines/furannes. Institut national de santé publique du Québec, Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels. Rapport complet. 13 pp.

Fromme, H., Küchler, T., Otto, T., Pilz, K., Müller, J. et Wenzel, A. (2002). Occurrence of phthalates and bisphenol A and F in the environment. Water Res. **36**, 1429-1438.

Gendebien, A., Ferguson, R., Brink, J., Horth, H., Sullivan, M., Davis, R., Brunet, H., Dalimier, F., Landrea, B., Krack, D., Perot, J. et Orsi, C. (2001). Survey of wastes spread on land. 4. Properties of wastes relevant to agricultural benefit and environmental impact. European Commission - Directorate - General for Environment. Final report n° CO 4953-2. 35-44.

Gerber, P., Opio, C. et Steinfeld, H. (2007). Poultry production and the environment - a review. Thieme, O. and Pilling, D. (eds.). International Poultry Conference, Bangkok, Thailand, 5-7 November 2007, Vol. n°9, 27 pp.

Ghafir, Y. et Coosemans, P. (2011). Rapport d'activités 2010. Bruxelles, Belgique, Agence fédérale pour la sécurité de la chaîne alimentaire (AFSCA). 279 pp.

Halling-Serensen, B., Nielsen, S.N., Lanzky, P.F., Ingerslev, F., H.C.H., L. et Jorgensen, S.E. (1998). Occurrence, fate and effects of pharmaceutical substances in the environment - A review. Chemosphere **36** (2), 357-393.

Kümmerer, K. (2008). Pharmaceuticals in the environment - A brief summary. In: Earth and Environmental Science, 3-21.

Li, Y.X. et Chen, T.B. (2005). Concentrations of additive arsenic in Beijing pig feeds and the residues in pig manure. Resour. Conserv. Recycl. **45**, 356-367.

Li, Y.X., Li, W., Wu, J., Xu, L.C., Su, Q.H. et Xiong, X. (2007). Contribution of additives Cu to its accumulation in pig feces : study in Beijing and Fuxin of China. J. Environ. Sci. **19**, 610-615.

McCartney, D.H., Block, H.C., Dubeski, P.L. et Ohama, A.J. (2006). Review : The composition and availability of straw and chaff from small grain cereals for beef cattle in western Canada. Can. J. Anim. Sci. **86**, 443-455.

Menzi, H. et Kessler, J. (1998). Heavy metal content of manures in Switzerland. Martinez, J. and Maudet, M.N. (eds.). 8th International Conference on the FAO ESCORENA Network on Recycling of Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture (RAMIRAN 98). Rennes, France, 26-29 May 1998, vol. 1, 495-506.

Menzi, H., Pain, B. et Smith, K. (1998). Solid manure in Europe. Results of a survey by the Working Group on Solid Manure of RAMIRAN. Martinez, J. and Maudet, M.N. (eds). Proc. 8th International Conference on the FAO ESCORENA Network on Recycling of Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture (RAMIRAN 98), Rennes, France, 26-29 May 1998, vol. 2, 383-399.

Mortvedt, J.J. (1996). Heavy metal contaminants in inorganic and organic fertilizers. Fert. Res. **43**, 55-61.

Nicholson, F.A., Chambers, B.J., Williams, J.R. et Unwin, R.J. (1999). Heavy metal contents of livestock feeds and animal manures in England and Wales. Bioresour. Technol. **70**, 23-31.

Nicholson, F.A., Smith, S.R., Alloway, B.J., Carlton-Smith, C. et Chambers, B.J. (2003). An inventory of heavy metals inputs to agricultural soils in England and Wales. Sci. Total Environ. **311**, 205-219.

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

Otero, N., Vitoria, L., Soler, A. et Canals, A. (2005). Fertiliser characterisation : Major, trace and rare earth elements. Appl. Geochem. **20**, 1473-1488.

Pereira, B. et Sonnet, P. (2007). La contamination diffuse des sols par les éléments traces métalliques en Région wallonne. Louvain-la-Neuve, Belgique, Université catholique de Louvain. Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallon. 27 pp.

Persoons, D., Dewulf, J., Catry, B., Imberechts, H., Butaye, P., Van der Stede, Y. et Laurier, L. (2009). Belgian Veterinary Surveillance of Antimicrobial Consumption. National consumption report. 27 pp.

Sager, M. (2007). Trace and nutrient elements in manure, dung and compost samples in Austria. Soil Biom. Biochem. **39**, 1383-1390.

Sims, J.T. et Wolf, D.C. (1994). Poultry Waste Management : Agricultural and Environmental Issues. Advances in Agronomy. Sparks, D.L. (ed.). Academic Press, vol. 52, 83 pp.

Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M. et de Haan, C. (2006). Livestock's long shadow - Environmental issues and options. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 390 pp.

Stevens, J.L. et Jones, K.C. (2003). Quantification of PCDD/F concentrations in animal manure and comparison of the effects of the application of cattle manure and sewage sludge to agricultural land on human exposure to PCDD/Fs. Chemosphere **50**, 1183-1191.

Torslov, J., Samsoe-Petersen, L., Rasmussen, J.O. et Kristensen, P. (1997). Use of waste products in agriculture. Denmark, Ministry of Environment and Energy, Danish Environmental Protection Agency. Environmental Project n°366. 211 pp.

Van den Berg, M., Birnbaum, L., Bosveld, A.T.C., Brunström, B., Cook, P., Feeley, M., Giesy, J.P., Hanberg, A., Hasegawa, R., Kennedy, S.W., Kubiak, T., Larsen, J.C., van Leeuwen, F.X.R., Liem, A.K.D., Nolt, C., Peterson, R.E., Poellinger, L., Safe, S., Schrenk, D., Tillitt, D., Tysklind, M., Younes, M., Waern, F. et Zacharewski, T. (1998). Toxic Equivalency Factors (TEFs) for PCBs, PCDDs, PCDFs for Humans and Wildlife. . Env. Health Perspect. **106** (12), 775-792.

Van Kauwenbergh, S.J. (2002). Cadmium content of phosphate rocks and fertilizers. IFA Technical Conference, Chennai, India, 24-27 September 2002, 39 pp.

Xiong, X., Yanxia, L., Wei, L., Chunye, L., Wei, H. et Ming, Y. (2010). Copper content in animal manures and potential risk of soil copper pollution with animal manure use in agriculture. Resour. Conserv. Recycl. **54**, 985-990.

Zhao, L., Dong, Y.H. et Wang, H. (2010). Residues of veterinary antibiotics in manures from feedlot livestock in eight provinces of China. Sci. Total Environ. **408**, 1069-1075.

4.2. Communications personnelles

Destain Jean-Pierre (2011). Centre wallon de Recherches agronomiques (CRA-W).

Dumont du Chassart Quentin (2011). Service Public Fédéral (SPF). DG Animaux, Végétaux et Alimentation. Service Denrées alimentaires, Aliments pour animaux et Autres produits de consommation.

Ghysel François (2011). Service Public de Wallonie (SPW). Direction de la Protection des sols (DPS).

Godden Bernard (2011). Agra-Ost (asbl).

Hubin Marcel (2011). Société Lhoist (sa).

Lambert Marcel (2011). Réquasud (asbl).

Luxen Pierre (2011). Agra-Ost (asbl).

Parmentier Jean-Marie (2011). Société Rosier (sa).

Théron Léonard (2011). Université de Liège. (ULg). Faculté de Médecine vétérinaire. Service de Thériogénologie des animaux de production.

Van der Broeck Paul (2011). Société Promagro (Haspargit).

4.3. Sites web

Carmeuse (2011). Lime production process. URL : http://www.carmeuse.com/page.asp?langue=EN&id=48, consulté le 25/10/2011.

IFA (2011). Glossary of fertilizer terms. URL: http://www.fertilizer.org/ifa/HomePage/LIBRARY/Glossary-of-fertilizer-terms/Access.html, consulté le 2/11/2011.

UNIFA (2011). Fabrication des engrais et amendements. URL : http://www.unifa.fr/nourrir-les-plantes/engrais-et-amendements/fabrication-des-engrais-et-amendements.html, consulté le 10/10/2011.

Pharma.be (2011). pharma.be animal health. URL: http://www.pharma.be/newsitem.aspx?nid=1415 , consulté le 12/11/2011.

Yara (2011). Simple Nitrogenous. URL: http://www.yara.fr/fertilizer/products/mainstream_products/simples_nitrogenous/solution_azoee_30.aspx, consulté le 22/10/2011.

PARTIE 2. PROPOSITION DE NOTE DE BASE POUR L'ÉTUDE DE LA PROBLÉMATIQUE DES GERMES PATHOGÈNES

1. INTRODUCTION

Parmi les matières fertilisantes, les matières organiques (endogènes et exogènes) peuvent contenir de nombreux micro-organismes. Une partie de ces derniers peut avoir un caractère pathogène. Les micro-organismes pathogènes peuvent causer des problèmes de santé publique et animale s'ils survivent dans l'environnement. La valorisation agronomique de ces matières organiques doit donc tenir compte de la présence potentielle de ces micro-organismes et du risque qu'elle génère. La revue bibliographique qui a été réalisée dans ce chapitre poursuit un objectif opérationnel : fournir des références spécifiques pour évaluer et gérer les possibilités de contaminations après épandages de matières organiques, engrais de ferme, composts, digestats ou boues de stations d'épuration sur les terres agricoles.

1.1. Définitions

1.1.1. Micro-organismes pathogènes

Un micro-organisme pathogène est un organisme ou une substance capable de causer une maladie chez l'être humain ou l'animal (Stehman *et al.*, 1996 *in* (Browman *et al.*, 2000)). Les pathogènes infectent les humains ou les animaux par différentes voies qui sont l'ingestion, l'inhalation et le contact dermique. La dose infectieuse, ou le nombre d'organismes pathogènes auxquels un humain ou un animal doit être exposé pour devenir infecté, varie selon l'organisme pathogène et l'état de santé de l'individu exposé (Anonyme, 1999b). Les micro-organismes pathogènes comprennent les bactéries, virus, parasites et champignons. Ce sont les trois premiers micro-organismes qui sont principalement impliqués dans les risques de pathologies humaines et animales.

1.1.2. Bactéries

Les bactéries sont des organismes vivants unicellulaires procaryotes caractérisés par l'absence de noyau et d'organite. Une bactérie peut être pathogène et induire une maladie chez l'homme ou l'animal. Elle est dite « opportuniste », si elle n'induit une pathologie que chez les personnes immunodéprimées.

1.1.3. Virus

Les virus sont des agents infectieux à la limite du monde vivant et du monde moléculaire, capables de pénétrer, de diffuser et de se multiplier dans un organisme hôte. Ils sont composés d'un génome viral : une molécule d'acide nucléique (ARN ou ADN) entourée d'une coque de protéine (la capside). Ils ne possèdent en général pas d'enzyme pouvant produire de l'énergie (Besson, 2010).

1.1.4. Parasites

Un parasite est un organisme qui vit dans (endoparasite) ou sur (ectoparasite) un autre animal (hôte) pour en tirer profit. Ils sont alors respectivement appelés endo- et ecto- parasites. Les parasites sont majoritairement des protozoaires et des helminthes (Besson, 2010).

Les protozoaires sont des êtres vivants unicellulaires eucaryotes, c'est-à-dire que la cellule possède un noyau entouré d'une membrane nucléique.

Les helminthes ou vers sont des endoparasites se nourrissant des tissus, aliments ou sang de leur hôte et en finissant parfois par le tuer. La plupart des endoparasites sont des nématodes,

trématodes, cestodes ou protozoaires. Ces parasites passent une partie de leur cycle de vie dans les matières fécales et les urines des animaux (Bell *et al.*, 1983).

Les nématodes subissent plusieurs étapes de leur cycle de développement dans les matières fécales et les différentes formes par lesquelles ils passent peuvent être plus ou moins résistantes aux conditions environnementales.

1.2. Cadre légal

Au niveau européen, le Règlement 1774/2002/CE établissant les règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux non destinés à la consommation humaine (Anonyme, 2002b) fixe des normes maximales admissibles pour la mise sur le marché des digestats et composts et des lisiers transformés et produits transformés à base de lisier.

Au niveau fédéral et wallon, il n'existe aucune règlementation en ce qui concerne les micro-organismes pathogènes qui peuvent se retrouver dans les matières organiques valorisées en agriculture.

1.2.1. Engrais de ferme

L'annexe 8 du Règlement 1774/2002/CE établissant les règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux non destinés à la consommation humaine (modifié par le Règlement 208/2006/CE) stipule que la mise sur le marché des lisiers transformés et produits transformés à base de lisier doivent être conformes aux normes microbiologiques suivantes :

- *Salmonella* : 5 échantillons de 25 g, absence ;
- entérobactéries : 5 échantillons de 1 g, maximum 1000 entérobactéries/g ;
- *Escherichia coli* : 5 échantillons de 1 g, maximum 1000 *Escherichia coli*/g.

1.2.2. Matières exogènes

Le Règlement 1774/2002/CE (modifié par le Règlement 208/2006/CE) stipule en son article 15 :
« *les usines de production de biogaz et les usines de compostage doivent veiller à ce que les résidus de digestion et le compost, le cas échéant, soient conformes aux normes microbiologiques suivantes* » :

- *Salmonella* : 5 échantillons de 25 g, absence ;
- entérobactéries : 5 échantillons de 1 g, valeur seuil de 1000 entérobactéries/g avec maximum 1 échantillon pour lequel le nombre d'Entérobactéries est compris entre 1000 (valeur seuil) et 5000 (valeur maximale)/g ;
- *Escherichia coli* : 5 échantillons de 1 g, valeur seuil de 1000 *Escherichia coli*/g avec maximum 1 échantillon pour lequel le nombre d'*Escherichia coli* est compris entre 1000 (valeur seuil) et 5000 (valeur maximale)/g.

2. BACTÉRIES

2.1. Engrais de ferme

Les bactéries sont naturellement présentes dans les matières fécales des animaux en bonne santé. Ces derniers peuvent en excréter un grand nombre. De nombreux pathogènes peuvent subsister longtemps dans les matières fécales animales. Même si les accidents sont rares, les risques de causer des problèmes de santé publique ne sont pas négligeables (Muirhead *et al.*, 2004 *in* (Culot, 2005)).

L'origine des contaminants peut être l'eau de consommation et la nourriture, particulièrement si elle a été produite avec de l'eau contaminée.

Les animaux (et le personnel de production) sont les premiers exposés aux pathogènes vu le contact étroit avec les matières fécales (Bell *et al.*, 1983).

Heinonen-Tanski (2006), a estimé que les excréments bruts de bovins peuvent contenir jusqu'à 10^9 à 10^{10} colonies de pathogènes totaux par gramme (UFC/g), dont 10^8 UFC/g étant des bactéries. Il existe un grand nombre de bactéries pathogènes pour l'homme et les animaux. Selon Vanotti (2004) *in* (Besson, 2010), le lisier de porc peut contenir des concentrations en agents pathogènes de $10^{3,89}$ UFC/g de *Salmonella*, $10^{6,79}$ UFC/g de coliformes totaux, $10^{6,23}$ UFC/g de coliformes fécaux et $10^{5,73}$ UFC/g d'enterocoques.

Les *Salmonella spp.* sont les pathogènes les plus communs chez les animaux d'élevage (USEPA, 1998 *in* (Browman *et al.*, 2000)). Ces derniers sont une source importante de différentes *Salmonella spp.* infectieuses pour les humains. *Salmonella dublin* est un des sérotypes les plus fréquemment isolés à partir des bovins. Les *Salmonella spp.* sont souvent présentes chez les volailles (Steinfeld *et al.*, 2006).

Les *Salmonella* se trouvent initialement dans les matières fécales des animaux infectés et peuvent y survivre quelques mois (Taylor et Borrows, 1971 ; Tannock et Smith, 1972 *in* (Bell *et al.*, 1983)). *Salmonella* peut vivre jusque 286 jours dans le lisier de bovin (Strauch et Ballarini, 1994 *in* (Pereira et Sonnet, 2007)) mais généralement, 90 % des Salmonella ont disparu après un mois.

Les bovins et porcs peuvent être porteurs de la *Leptospira* sans avoir de symptômes. Cette bactérie ne peut pas survivre longtemps en dehors de l'hôte. Diesch *et al.* (1971) *in* (Bell *et al.*, 1983) a par exemple montré qu'elle ne pouvait vivre que 11 jours dans les excréments aérés de bovins.

Escherichia coli est communément associé aux matières fécales car c'est le seul coliforme qui ne se trouve pas dans l'environnement mais dans les matières fécales (USEPA, 1998 *in* (Browman *et al.*, 2000). Les bovins ont été identifiés comme étant la source principale de contamination par la souche O157 H7 (Steinfeld *et al.*, 2006). Les génisses et les veaux sont plus sujet à excréter la souche O157 H7 d' *Escherichia coli* (Wells *et al.*, 1957 *in* (Pell, 1997)).

Le *Clostridium perfringens* fait partie de la flore intestinale normale de l'homme et des animaux. Il peut infecter l'homme et le rendre malade (gangrène gazeuse par exemple) (Bell *et al.*, 1983). Les spores du *Clostridium botulinum* sont résistantes à la chaleur. Les types A, B, E et F causent le botulisme chez l'humain et les types C et D chez les animaux. *Clostridium botulinum* peut être transporté par ruissellement jusqu'aux eaux de surface (Steinfeld *et al.*, 2006).

Erysipelothrix rhusiopathiae touche particulièrement les porcs mais peut aussi se retrouver chez l'homme et les volailles.

Mycobacterium paratuberculosis est excrété dans les matières fécales des animaux d'élevage et peut y survivre au moins un an (Bell *et al.*, 1983). *Mycobacterium avium* est excrété par les volailles.

Les pathogènes les plus fréquemment étudiés sont *Clostridium spp.* et *Salmonella spp.* (Alexander *et al.*, 1968 *in* (Sims et Wolf, 1994)) ont étudié 44 échantillons d'excréments de poulet, poule et dinde et ont trouvé que *Clostridium spp.* était présent dans 60 % des échantillons. Kraft *et al.* (1969) *in* (Sims et Wolf, 1994) ont analysé des excréments de volailles frais et ont trouvé *Salmonella spp.* dans 29 % des échantillons avec des niveaux de 1/g à plus de 3.10^4 UFC/g MS.

Les bactéries pathogènes pour la santé humaine et animale se trouvant dans les matières fécales des animaux d'élevage sont reprises dans le Tableau 27.

Tableau 27. Bactéries pathogènes pouvant se retrouver dans les engrais de ferme ; « + » signifie présence dans les matières fécales animales sans précision supplémentaire ; « ++ » présence précisée dans les matières fécales de l'animal.

Groupe	Microorganisme	Excréments		
		Bovin	Porc	Volaille
Bactéries	*Bacillus anthracis*	+	+	+
	Bacteriodes nodusus	+	+	+
	Borrellia anserina	+	+	++
	Campilobacter coli	+	++	++
	Campilobacter fetus	++	++	++
	Campilobacter jejuni	++	++	++
	Campilobacter spp.	++	+	+
	Chlamydia psittaci	+	+	+
	Clostridium botulinum	+	+	+
	Clostridium perfringens	++	++	++
	Clostridium spp.	+	+	++
	Corynebacterium spp.	+	+	+
	Erysipelothrix rhusiopathiae (Erysipelothrix insidiosa)	+	++	++
	Escherichia coli	++	++	+
	Escherichia coli (O157 H7)	++	+	+
	Escherichia coli (souches pathogènes)	++	++	rare
	Fusobacterium necrophorum (Sphaerophorus necrophorus)	++	+	+
	Leptospira spp.	++	++	+
	Listeria monocytogenes	++	++	rare
	Mycobacterium avium	+	+	++
	Mycobacterium partuberculosis	++	+	+
	Pasturella anatipestifer	+	+	++
	Pasturella multocida	+	+	++
	Pasturella spp.	+	+	+
	Salmonella choleraesuis	+	++	+

Groupe	Microorganisme	Excréments		
		Bovin	Porc	Volaille
Bactéries	*Salmonella dublin*	++	+	+
	Salmonella enteridis	+	+	++
	Salmonella Montevideo	++	+	+
	Salmonella Newport	++	+	+
	Salmonella pullorum	+	+	++
	Salmonella ssp.	++	++	++
	Salmonella typhimurium	++	++	++
	Spirochaeta penartha	+	+	+
	Staphylococcus spp.	+	+	+
	Streptococcus spp.	+	+	+
	Treponema hyodysenteriae	+	++	+
	Vibrio cholerae	+	+	++
	Yersinia enterocolitica	++	++	++
	Yersinia pseudotuberculosis	++	++	++

2.2. Boues

Les matières exogènes peuvent contenir un grand nombre de micro-organismes pathogènes. Les trois types d'agents pathogènes les plus importants pour les humains (bactéries, virus, parasites) peuvent se retrouver dans les eaux usées domestiques (Anonyme, 1999b).

Les espèces rencontrées et les concentrations observées dans les eaux usées dépendent de divers facteurs dont le niveau sanitaire de la population raccordée au réseau d'égouttage. Elles peuvent varier au cours du temps (Anonyme, 1999b). Les agents pathogènes dans les boues de stations d'épuration sont majoritairement associés aux particules en suspension. Les procédés de traitements primaires des eaux usées concentrent les particules en suspension dans les boues, par conséquent les boues primaires ont des concentrations en agents pathogènes supérieures aux eaux usées d'entrée (CSHPF, 1998).

Les boues issues de ces traitements peuvent ainsi contenir une large gamme de micro-organismes pathogènes (Anonyme, 1999b; Gendebien, 2010). Les teneurs en germes pathogènes varient en fonction du type de boue considéré (primaire, secondaire).

Les teneurs en entérobactéries, coliformes (totaux et fécaux), *Escherichia coli*, *Clostridium perfringens* dépendent du type de traitement (Anonyme, 1999b). Elles sont systématiquement plus faibles dans les boues chaulées à pH 12 (Stordeur *et al.*, 2001).

Pour les boues résiduaires, les agents pathogènes qui se propagent dans le système entérique et urinaire des humains et des animaux et qui sont libérés dans les matières fécales et les urines posent le plus grand risque en matière de santé publique (Anonyme, 1999b).

Les bactéries pathogènes les plus souvent impliquées dans la contamination des boues sont *Salmonella spp.*, *Shigella spp.*, *Yersinia spp.*, *Vibrio cholerae*, *Campylobecter jejuni*, *Escherichia coli* (souches pathogènes) (Schwartzbrod *et al.*, 1998 *in* (Stordeur *et al.*, 2001)). D'autres bactéries pathogènes ou opportunistes peuvent se développer ou subsister dans ces matrices, spécialement lorsqu'on y introduit des résidus d'épuration d'hôpitaux (Stordeur *et al.*, 2001).

2.3. Digestats

La digestion anaérobie est un outil de traitement des déchets appliqué à de nombreux types de substrats via différents procédés industriels le plus souvent en vue de leur recyclage par épandage agricole (Couturier et Galtier, 1998; Culot, 2005). C'est un processus de biodégradation anaérobie de la matière organique par des populations microbiennes. Elle conduit à la formation d'un gaz composé principalement de méthane et de gaz carbonique (Couturier et Galtier, 1998).

Elle permet à la fois de dépolluer des produits (des germes pathogènes, des odeurs, etc.), de recycler la matière organique, de produire une énergie locale et renouvelable.

Les matières méthanisables sont les boues de STEP, les engrais de ferme, les résidus de cultures, les biodéchets humides et les sous-produits animaux (Fievez, 2011). Les matières premières utilisées pour réaliser la biométhanisation peuvent être plus ou moins chargées en micro-organismes pathogènes.

La fermentation anaérobie peut se dérouler entre 5 et 65°C. On définit classiquement trois plages de températures autour d'une valeur optimale relative :

- la zone psychrophile, de 4 à 25°C ;
- la zone mésophile, de 35 à 45°C ;
- la zone thermophile, de 55 à 65°C.

La biométhanisation mésophile est bien moins efficace pour la destruction des pathogènes que le procédé thermophile (Couturier et Galtier, 1998; Culot, 2005).

La digestion anaérobie ne résout donc pas systématiquement le problème des agents pathogènes contenus dans les matières traitées. La digestion anaérobie thermophile est un procédé hygiénisant du point de vue des germes pathogènes (sélection des germes thermotolérants), à la différence des procédés mésophiles qui devraient s'appliquer soit à des produits non contaminés, soit être complétés par d'autres traitements (pasteurisation, compostage) (Couturier et Galtier, 1998; Besson, 2010).

La digestion anaérobie thermophile est plus efficace par rapport à la réduction du nombre de bactéries pathogènes. En effet, par rapport à la digestion mésophile, le digestat issu de la digestion thermophile répond à la réglementation sanitaire européenne. Elle permet une réduction de 0 à 10^5 de bactéries indicatrices. Ainsi, les bactéries indicatrices sont présentes dans le digestat à hauteur de 0 à 10^3 UFC/g, sans aucune *Salmonella* décelée (Besson, 2010).

La digestion thermophile (55°C, >15 jours) est capable d'assurer l'hygiénisation des produits traités mais n'a pas d'impact sur la réduction des bactéries sporulées *Bacillus cereus* et *Clostridium spp.* (Couturier et Galtier, 1998; Besson, 2010). Une augmentation du nombre de ces deux bactéries peut même être constatée en conditions mésophiles (Marache, 2001 ; *in* (Besson, 2010)).

Les résultats obtenus par Bayard (2008) (cités par Besson (2010)) montrent l'efficacité de la digestion mésophile face à la digestion

Tableau 28. Bactéries pathogènes pouvant se retrouver dans les matières exogènes ; « ++ » signifie présence précisée dans la matière exogène.

Groupe	Microorganisme	Boues	Digestats	Composts
Bactéries	*Acrobacter spp.*	++		
	Aeromonas mobiles	++		
	Bacillus anthracis	++		
	Bacillus cereus		++	
	Campilobacter jejuni	++		
	Campilobacter spp.	++		
	Clostridium botulinum	++		++
	Clostridium perfringens	++		++
	Clostridium spp.		++	
	Escherichia coli (souches pathogènes)	++		++
	Klebsiella spp.	++		
	Leptospira spp.	++		
	Listeria monocytogenes	++		++
	Mycobactérium spp.	++		
	Mycobactérium tuberculosis	++		
	Pseudomonas aeruginosa	++		
	Salmonella enteritis			++
	Salmonella ssp.	++		
	Salmonella typhi	++		
	Shigella spp.	++		
	Vibrio cholerae	++		
	Yersinia enterocolitica	++		

3. VIRUS

3.1. Engrais de ferme

L'excrétion de virus dans les matières fécales se produit lorsque les animaux sont malades ou en convalescence. Dans certains cas, les virus peuvent être excrétés continuellement ou de manière intermittente durant des mois, voire des années. Ils sont excrétés par différentes voies dont les urines et les matières fécales. Pour les matières fécales, les virus excrétés comprennent notamment les picornavirus (entérovirus), parvovirus, rinderpest, réovirus, herpesvirus, adénovirus, rotavirus, la fièvre du porc et les myxovirus (Bell *et al.*, 1983; Steinfeld *et al.*, 2006)

Le Tableau 29 reprend les virus pouvant se trouver dans les engrais de ferme.

Tableau 29. Virus pouvant se retrouver dans les engrais de ferme ; « + » signifie présence dans les matières fécales animales sans précision supplémentaire ; « ++ » présence précisée dans les matières fécales de l'animal.

Groupe	Micro-organisme	Excréments		
		Bovin	Porc	Volaille
Virus	Virus de la "Fièvre du porc"	+	++	+
	Adénovirus	+	+	+
	Astrovirus	+	+	+
	Coronavirus	++	+	+
	Entérovirus d'origine bovine	+	+	+
	Herpesvirus	+	+	+
	Myxovirus	+	+	+
	Parvovirus	+	++	+
	Picornavirus	+	+	+
	Réovirus	+	+	+
	Rinderpest	+	+	+
	Rotavirus d'origine bovine	++	+	+
	Virus de l'hépatite A	+	+	+
	Virus de l'hépatite E	+	+	+

3.2. Boues

Les boues de station d'épuration contiennent de nombreux virus comme le rotavirus, pathogène chez l'animal (Gendebien, 2010) et l'homme, en particulier chez les enfants.

3.3. Digestats

Les entérovirus et les parvovirus sont résistants en conditions mésophiles (Couturier et Galtier, 1998). Le parvovirus ne subit aucune réduction du fait de sa thermo-résistance (Laurent Emmanuel Marache, 2001 in (Besson, 2010)).

3.4. Composts

Il y a très peu d'information sur la survie des virus au cours du processus de compostage (Jones et Martin, 2003). De par leur plus grande résistance par rapport aux autres virus et à la plupart des bactéries, les bactériophages peuvent être utilisés en tant qu'indicateurs de l'efficacité de l'hygiénisation lors du compostage.

Le Tableau 30 reprend les virus qui peuvent se retrouver dans les boues, les digestats et les composts.

Tableau 30. Virus pouvant se retrouver dans les matières exogènes ; « ++ » signifie présence précisée dans la matière exogène.

Groupe	Micro-organisme	Boues	Digestats	Composts
Virus	Adénovirus	++		
	Astrovirus	++		
	Calicivirus	++		
	Coronavirus	++		
	Coxsackievirus (entérovirus)	++		
	Echovirus (entérovirus)	++		
	Entérovirus		++	
	Influenza	++		
	Parvovirus	++	++	
	Poliovirus	++		
	Polyomavirus (JC et BK)	++		
	Polyvirus (entérovirus)	++		
	Réovirus	++		
	Rotavirus	++		
	Virus de l'hépatite A	++		
	Virus de l'hépatite C	++		
	Virus de l'hépatite E	++		
	Virus de Norwalk et apparentés	++		

4. PARASITES

4.1. Engrais de ferme

Parmi les parasites présents dans les engrais de ferme, on peut citer *Cryptosporidium parvum* et *Giardia spp*. qui sont les parasites de premier intérêt pour la santé publique (Ghiorse, 1996 *in* (Browman *et al.*, 2000); Kramer *et al.*, 1996 *in* (Pell, 1997)). Les réservoirs de ces deux parasites sont les animaux sauvages, l'homme et les animaux d'élevage (Winpisinger-Slay et Berry, 1999 *in* (Browman et al., 2000)).

Les bovins sont une source de parasites pour les êtres humains et beaucoup d'autres espèces (Olsen *et al.*, 2004 ; Slifko Smith et Rose, 2000 ; Atwill, 1995 *in* (Steinfeld *et al.*, 2006)). Parmi les parasites, ce sont *Giardia spp.*, *Cryptosporidium spp.*, *Microsporidium spp.* et *Fasciola spp.* qui représentent les risques les plus importants (Steinfeld *et al.*, 2006).

Quatorze espèces de *Microsporidia spp.* ont été identifiées en tant que pathogènes émergeants chez l'homme. *Microsporidia spp.* est présent chez un grand nombre d'animaux d'élevage (bovins, porcs).

Fasciola spp. est un parasite important chez les herbivores.

Le Tableau 31 reprend les principaux parasites pouvant être trouvés dans les engrais de ferme.

Tableau 31. Parasites pouvant se retrouver dans les engrais de ferme ; « + » signifie présence dans les matières fécales animale sans précision supplémentaire ; « ++ » présence précisée dans les matières fécales de l'animal.

Groupe	Micro-organisme	Excréments		
		Bovin	Porc	Volaille
Parasites	*Ascaris suum* (helminthes)	++	++	+
	Coccidae	++	++	++
	Cryptosporidium parvum (protozoaires)	++	+	+
	Cryptosporidium spp. (protozoaires)	++	+	+
	Dictyocaulus viviparus	++	+	+
	Fasciola spp. (helminthes)	++	++	+
	Giardia lambia (protozoaires)	+	+	+
	Giardia spp. (protozoaires)	++	+	+
	Microsporidium spp.	++	++	+
	Nematodirus helvetianus (helminthes)	++	+	+
	Trichostrangylidae	++	+	+

4.2. Boues

En ce qui concerne les helminthes, la contamination des boues est quasiment systématique (Déportes *et al.*, 2007).

Pour les boues n'ayant subi aucun traitement, la viabilité des helminthes serait comprise entre 27 et 94 % (Cadiergues, 2000).

En ce qui concerne les protozoaires, on retrouve des kystes de *Giardia spp.* en quantités assez importantes dans les boues non traitées (primaires, secondaires et mixtes) (Thiriat, 1998).

Globalement, les œufs d'helminthes viables peuvent classiquement survivre dans des boues stockées pendant plus de 4 mois. Au-delà de 6 mois, le stockage des boues entraîne une réduction du nombre d'œufs capables de se développer normalement (Déportes *et al.*, 2007).

4.3. Digestats

La réduction des parasites en digestion anaérobie est dépendante de l'espèce des parasites et de la température, la digestion thermophile est plus efficace que la mésophile.

En réacteur semi continu, il y a une dévitalisation des nématodes de bovins et coccidies à des températures allant de 50 à 60°C, alors qu'il n'y en a aucune en conditions mésophiles (Marache, 2001 *in* (Besson, 2010)).

Certains parasites peuvent être très résistants comme *Eimeria* et *Schistosoma* (Besson, 2010).

4.4. Composts

Des organismes résistants comme les kystes et les œufs de protozoaires et d'helminthes peuvent survivre au processus de compostage (Jones et Martin, 2003).

Les œufs d'*Ascaris lumbricoides* sont très résistants et peuvent être un indicateur de l'efficacité du compostage vis-à-vis des parasites (Mara et Cairncross, 1989 *in* (Jones et Martin, 2003)).

Le Tableau 32 reprend les parasites qui peuvent se retrouver dans les boues, les digestats et les composts.

Tableau 32. Parasites pouvant se retrouver dans les matières exogènes ; « ++ » signifie présence précisée dans la matière exogène.

Groupe	Microorganisme	Boues	Digestats	Composts
Parasites	*Ancylostoma duodenale (Helminthes)*	++		
	Ascaris lumbricoïdes (Helminthes)	++		++
	Ascaris suum (Helminthes)	++		
	Balantidium coli (Protozoaires)	++		
	Cryptosporidium parvum (Protozoaires)	++		
	Cryptosporidium spp. (Protozoaires)	++		
	Cyclospora cayetensis (Protozoaires)	++		
	Diphyllobothrium latum (Helminthes)	++		
	Echinococcus gramulosus (Helminthes)	++		
	Eimeria (Coccidae)		++	
	Encephalitozoon intestinalis (Protozoaires)	++		
	Entamoeba histolytica (Protozoaires)	++		
	Fasciola hepatica (Helminthes)	++		
	Giardia intestinalis (Protozoaires)	++		
	Giardia lambia (Protozoaires)	++		
	Hymenoleptis spp. (Helminthes)	++		
	Kystes et œufs de protozoaires			++
	Kystes et œufs d'helminthes			++
	Necator americanus (Helminthes)	++		
	Sarcocystis spp. (Protozoaires)	++		
	Schistosoma (trematode)		++	
	Taenia saginata (Helminthes)	++		
	Taenia saginata (Helminthes)	++		
	Taenia solium (Helminthes)	++		
	Toxocara canis (Helminthes)	++		
	Toxoplasma gondii (Protozoaires)	++		
	Trichuris trichiura (Helminthes)	++		
	Vittaforma corneae (Protozoaires)	++		

5. SURVIE DANS LES SOLS

5.1. Facteurs affectant la survie des micro-organismes pathogènes dans les sols

Suite à leur épandage sur les sols agricoles, les micro-organisemes pathogènes peuvent survivre, selon les conditions environnementales et se retrouver potentiellement dans différents milieux (sol, eau, air).

Bien que la plupart de ces micro-organismes aient des difficultés à croître à la suite du changement des conditions du milieu et de la compétition microbienne pour accéder à la nourriture (Besson,

2010), divers micro-organismes peuvent survivre durant des jours, voire des semaines dans les matières fécales épandues sur les terres agricoles (Steinfeld *et al.*, 2006).

La survie des pathogènes dans l'environnement est affectée par divers facteurs (USEPA, 1998 *in* (Browman *et al.*, 2000); Menzies *et al.*, 1977 ; Reddy *et al.* 1981 *in* (Sims et Wolf, 1994)). Ces facteurs sont :

- la lumière du soleil ;
- l'humidité ;
- la température (élevée) ;
- la fluctuation de la température (cycles de gel/dégel) ;
- le pH (extrême) ;
- le niveau d'oxygène ;
- les autres corps microbiens.

La présence de Cu (dans les litières par exemple) peut aussi influencer la dynamique des populations microbiennes (Johnson *et al.* 1985 *in* (Sims et Wolf, 1994)).

Les populations microbiennes d'un sol normal peuvent avoir un effet destructif sur les pathogènes (Waksman et Wodruff, 1940 *in* (Bell *et al.*, 1983)). Elliott et Ellis (1977) *in* (Bell *et al.*, 1983)) suggèrent que l'épandage des engrais de ferme sur le sol diminue la survie des pathogènes et leur virulence.

Le Tableau 33 présente les temps de survie maxima (absolus et habituels) dans les sols des différents micro-organismes pathogènes. Nous pouvons voir dans ce tableau que la résistance générale des helminthes dans les sols est plus élevée par rapport aux autres micro-organismes (de l'ordre de quelques années). Les virus ont des résistances de l'ordre du mois tandis que certaines bactéries peuvent aller jusqu'à un an.

Tableau 33. Temps de survie des différents groupes de micro-organismes pathogènes dans le sol (Gerba et Smith, 2005).

Survie des pathogènes dans le sol		
Groupe	**Maximum habituel**	**Maximum absolu**
Bactéries	2 mois	1 an
Virus	3 mois	6 mois
Protozoaires	2 jours	10 jours
Helminthes	2 ans	7 ans

5.2. Bactéries

La survie des bactéries dépend de la température, du pH, de la composition du sol, de l'humidité mais aussi de la présence de nutriments, d'autres micro-organismes et de la luminosité (UV) (Paavola, 2008 *in* (Besson, 2010)).

Les bactéries sont, en général, les pathogènes les plus sensibles aux conditions environnementales en dehors du tractus digestif de leur hôte. Leur nombre décroît très rapidement lors de l'exposition à la lumière, à la dessiccation et aux phénomènes d'antagonismes exercés par la microflore naturelle des sols (Smith, 1996). Cependant, certaines bactéries dites opportunistes sont naturellement présentes dans les milieux naturels et adaptées pour y vivre. Morrison et Martin (1977) *in* (Bell *et al.*, 1983)) ont signalé, parmi d'autres, la persistance de l'anthrax, *Clostridium spp.* et *Salmonella spp.*.

Les phénomènes de « recroissance » sont caractéristiques des salmonelles et des coliformes fécaux. Ainsi, il est possible d'observer une « recontamination » des boues épandues après un épisode pluvieux (NRC, 2002). Gibbs *et al.* (1997) *in* (Déportes *et al.*, 2007)) ont ainsi observé la « recroissance » des salmonelles après de longues périodes de latence dans des sols ayant reçu des boues déshydratées et stabilisées par digestion anaérobie.

Le taux d'humidité, le type de sol, la présence de matière végétale en décomposition et la saison semblent être les principaux facteurs qui influencent la survie de *Listeria monocytogenes* dans le sol (Dowe 1997; Garrec 2003). Dans une étude anglaise (Nicholson *et al.*, 2005), la survie d'*Escherichia coli* O157 H7, *Salmonella spp.*, *Campylobacter jejuni* dans les sols ne dépassait pas un mois tandis que celle de *Listeria monocytogenes* dépassait un mois. Les sols argileux semblent être plus favorables pour le maintien de ces 4 pathogènes que les sols sableux.

Les bactéries telles que *Listeria monocytogenes* et *Mycobacterium paratuberculosis* sont largement répandues dans l'environnement (Bille et Doyle, 1991 ; Roberts *et al.*, 1991 *in* (Pell, 1997)). Les endospores formées par les bactéries comme *Clostridium perfringens* et *Bacillus anthracis* peuvent survivre dans des conditions plus sévères que les autres bactéries ne peuvent le faire (Pell, 1997). Le *Clostridium perfringens* se trouve facilement dans le sol (Bell *et al.*, 1983).

Erysipelothrix rhusiopathiae est largement distribué dans la nature et survit longtemps dans les sols, et plus particulièrement dans les sols alcalins (Wood et Parcker, 1972 *in* (Bell *et al.*, 1983)).

Mycobacterium paratuberculosis peut survivre au moins un an dans le sol. *Mycobacterium avium* peut persister durant 4 ans dans les sols où sont épandues les matières fécales (Bell *et al.*, 1983).

Le Tableau 34 reprend les parasites pour lesquels une persistance dans le sol a été précisée.

Tableau 34. Bactéries pathogènes dont la persistance dans le sol été précisée. "++" signifie persistance de l'ordre du mois, "+++" persistance de l'ordre de l'année, "---" aucune persistance.

Groupe	Micro-organisme	Sol	Références
Bactéries	*Bacillus anthracis*	+++	18
	Bacteriodes nodusus	---	4
	Campilobacter jejuni	++	6, 17
	Clostridium perfringens	+++	4, 5
	Clostridium spp.	+++	20, 11, 5, 8
	Erysipelothrix rhusiopathiae (Erysipelothrix insidiosa)	+++	5, 4
	Escherichia coli (O157 H7)	++	17, 21, 11
	Listeria monocytogenes	+++	17, 6, 11, 5, 18
	Mycobacterium avium	+++	6
	Mycobacterium partuberculosis	+++	6, 5, 18
	Salmonella ssp.	+++	6, 17, 21, 11, 20, 18, 11

5.3. Virus

En général, les virus ont tendance à ne pas survivre longtemps à l'extérieur de l'hôte (Bell *et al.*, 1983) ; du moins, leur nombre n'augmente pas une fois relâchés dans l'environnement. Un grand nombre d'entre eux peut tolérer la sécheresse, surtout à basse température.

Les hautes températures et la lumière du jour inactivent les virus. Cette inactivation dépend du virus et d'autres facteurs comme la présence d'oxygène, la concentration en virus, le milieu, l'hydratation et l'environnement ionique.

La persistance des virus dans l'environnement dépend aussi de l'adsorption par le sol ou de l'intégration aux particules solides en suspension, du pH et de la présence d'autres bactéries pouvant inactiver le virus (Pesaro *et al.* 1995 ; Deng et Cliver, 1995 *in* (Pell, 1997)).

Les virus peuvent ainsi être adsorbés par les composés du sol et rester infectieux (Bell *et al.*, 1983). D'un côté, l'adsorption des virus par le sol peut avoir un effet protecteur en favorisant la survie des virus (protection contre les enzymes protéolytiques, UV) mais elle peut avoir, d'un autre côté, un effet inactivant (les rendre non infectieux par libération et dégradation de l'acide nucléique). Des auteurs ont trouvé que des réovirus élués du sol sont intacts mais présentent une faible infectiosité (Monpoého, 2001 *in* (Besson, 2010)).

Une étude (Goyal et Gerba, 1979) a montré que les sols ayant une acidité égale ou inférieure à 5 adsorbent plus facilement les virus.

L'oxydation par l'aération est un des facteurs contribuant à l'inactivation spontanée des virus.

Les entérovirus et parvovirus semblent être plus résistants dans l'environnement et peuvent survivre durant des semaines voire des mois selon les conditions environnementales (température et autres conditions) (USEPA, 1998 ; Stehman *et al.*, 1996 *in* (Browman *et al.*, 2000)). Les entérovirus comprennent l'adénovirus, le réovirus, le rotavirus, l'entérovirus, les virus de l'hépatite A et E et d'autres (Browman *et al.*, 2000).

Certains virus se trouvant dans les matières fécales des bovins sont plus stables dans l'environnement. Ce sont les adénovirus, les parvovirus, les rotavirus d'origine bovine, les astrovirus et les entérovirus d'origine bovine (Dinter et Morein, 1990 *in* (Pell, 1997)).

5.4. Parasites

Les parasites ne peuvent pas se multiplier dans l'environnement (Besson, 2010).

La survie des œufs et larves de parasites dans le sol dépend de la température (détruits avec la chaleur mais pas nécessairement avec le froid), la dessiccation (détruits avec la dessiccation, surtout les œufs et les larves pré-infectieuses), la lumière du soleil et les conditions climatiques (fluctuations importantes des températures, végétation protégeant les parasites, etc.) (Bell *et al.*, 1983).

Les kystes (*Giardia spp.*) et oocystes (*Cryptosporidium parvum*) formés avant l'expulsion dans l'environnement via les matières fécales peuvent résister à diverses pressions environnementales et peuvent rester viables dans l'environnement durant plus d'un an (Current, 1988 *in* (Pell, 1997)).

Dans les sols, les survies sont étalées sur une période large (entre 1 mois et plus de 36 mois). Des durées importantes (> 12 mois) sont observées dans les horizons profonds (> 10 cm) et dans les sols présentant un fort degré d'humidité.

Les œufs d'helminthes (pathogènes entériques) sont plus résistants que les bactéries pathogènes et les virus. Le *Taenia saginata* et les *Ascaris spp.* sont très résistants à la dessiccation (Smith, 1996 *in* (Pell, 1997)). Ils peuvent survivre pendant plusieurs années surtout dans des sols argileux sous des climats tempérés. Même dans des conditions défavorables à leur survie, ils peuvent être retrouvés plusieurs semaines et jusqu'à 18 mois après l'épandage (Cadiergues 2000 *in* (Besson, 2010)). Gaspard (1995) *in* (Pell, 1997) a réalisé des essais de survie d'œufs d'*Ascaris spp.* sur des sols argilo-limoneux et sableux. Les résultats montrent que l'humidité du sol est le facteur primordial favorisant une bonne survie des œufs avec cependant une forte influence de la

température diminuant la survie en sol sableux. Les conditions de survie les plus favorables ont été obtenues pour un sol argilo-limoneux à 30 % d'humidité (Déportes *et al.*, 2007).

D'après le rapport de l'AFSSA (2002 *in* (Déportes *et al.*, 2007)), certains paramètres jouent un rôle majeur dans la diffusion des oocystes de *Cryptosporidium spp.* et leur persistance dans l'environnement :

- la végétation a un rôle protecteur sur la viabilité des oocystes en favorisant leur microenfouissement dans le sol ;
- les fortes températures et la concentration tellurique en ammoniaque diminuent la survie des oocystes.

Cryptosporidium parvum et *Giardia spp*. peuvent rester viables dans l'environnement durant de longues périodes de temps ; jusqu'à une période de 12 mois pour *Cryptosporidium* (Winpisinger-Slay et Berry, 1999 *in* (Browman *et al.*, 2000)).

Certains parasites sont plus résistants comme *Ascaris suum* qui peut vivre en conditions humides et à des température de 5 à 20°C durant 2 ans (Soulsby, 1965 *in* (Bell *et al.*, 1983)). Smith (1972 *in* (Bell *et al.*, 1983)) a montré que *Nematodirus helvetianus* peut survivre durant deux hivers dans les sols de la province de l'ouest du Canada.

Le Tableau 35 reprend les parasites pour lesquels une persistance dans le sol a été précisée.

Tableau 35. Parasites dont la persistance dans le sol été précisée. "+++" signifie persistance de l'ordre de l'année.

Groupe	Micro-organisme	Sol	Références
Parasites	*Ascaris suum* (helminthes)	+++	5, 4
	Cryptosporidium spp. (protozoaires)	+++	6, 21, 11, 18
	Giardia spp. (protozoaires)	+++	6, 21, 11, 18
	Nematodirus helvetianus (helminthes)	+++	4
	Taenia saginata (helminthes)	+++	16

Les conditions de l'environnement ne sont donc pas nécessairement suffisantes pour éliminer les parasites.

6. CONCLUSIONS

Les engrais de ferme et les matières exogènes peuvent contenir un grand nombre de micro-organismes pathogènes. Ce sont principalement les engrais de ferme et les boues résiduaires des stations d'épuration qui en contiennent le plus.

Parmi les germes pathogènes présents dans ces matières, un certain nombre peut persister dans les sols. Certaines bactéries et les parasites plus particulièrement sont capables de survivre dans les sols pendant une durée de l'ordre d'une année.

En fonction des conditions environnementales, ces pathogènes vont survivre voire se multiplier (cas des salmonelles).

Parmi les bactéries pathogènes *Bacillus anthracis, Clostridium perfringens, Clostridium spp., Erysipelothrix rhusiopathiae, Listeria monocytogenes, Mycobacterium avium, Mycobacterium partuberculosis et Salmonella ssp.* peuvent également survivre dans les sols pendant une période de l'ordre d'une année. *Escherichia coli (O157 H7) et Campilobacter jejuni* survivent plutôt durant quelques mois.

Les virus sont relativement peu résistants dans les sols ; de plus leur caractère infectieux peut avoir été considérablement affaibli.

Ascaris suum, Cryptosporidium spp., Giardia spp., Nematodirus helvetianus, Taenia saginata sont des parasites qui peuvent survivre dans le sol durant plus d'un an.

La présence d'antibiotiques dans les matières fécales des animaux d'élevage et dans l'environnement en général pourrait avoir un double effet sur les germes pathogènes présents dans les matières fertilisantes organiques. D'un côté, le nombre de micro-organismes pourrait être plus faible ; d'un autre côté, cela pourrait augmenter les risques représentés par ces germes par l'apparition de nouvelles résistances vis-à-vis des substances actives antibiotiques.

Les risques d'apports de micro-organismes pathogènes par les matières fertilisantes organiques sont donc réels, la persistance de certains d'entre eux dans les sols peut représenter un risque en termes de santé publique et animale.

Le nombre de pathogènes à détecter est potentiellement grand. L'utilisation de micro-organismes indicateurs de la présence de pathogènes dans les matières peut donc être utile. Une question majeure étant la limite qui doit être fixée pour s'assurer du niveau sanitaire des matières analysées.

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Anonyme (1998). Composted Animal Manures : Precautions and Processing. Anim. Waste Manage., 5 pp.
2. Anonyme (1999). Environmental Regulations and Technology. Control of Pathogens and Vector Attraction in Sewage Sludge. Report n°EPA/625/R-92/013. 181 pp.
3. Anonyme (2002). REGLEMENT (CE) n°1774/2002 DU PARLEMENT EUROPEEN ET DU CONSEIL du 3 octobre 2002 établissant des règles sanitaires applicables aux sous-produits animaux non destinés à la consommation humaine. L 273/1 - L 273/95.
4. Bell, R.G., Frank, R., MacLean, A.J., McQuitty, J.B., Miller, M.H., Robinson, J.B., Smith, H.J., Sutton, M.D., Webber, L.R. et Webber, M.D. (1983). Farm animal manures in the canadian environment. National Research Council of Canada. 135 pp.
5. Besson, M. (2010). La méthanisation en zones AOC Savoyardes. Connaissance et maîtrise des aspects sanitaires liés à l'épandage de digestat. LP Comesa - Promotion 2010. 37 pp.
6. Browman, A., Mueller, K. et Smith, M. (2000). Increased Animal Waste Production From Concentrated Animal Feeding Operations (CAFOs) : Potential Implications for Public and Environmental Health. The Nebraska Health and Human Services System (Lincoln), The Nebraska Center for Rural Health Research (Omaha). Report. 17 pp.
7. Carrington, E.G. (2001). Evaluation of sludge treatments for pathogen reduction. Final report n°CO 5026/1. 44 pp.
8. Couturier, C. et Galtier, L. (1998). Etat des connaissances sur le devenir des germes pathogènes et des micropolluants au cours de la méthanisation des déchets et sous-produits organiques. SOLAGRO, l'Agence Régionale de Mécanisation (ARM), l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse (ENVT) et l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse (ENSAT). Programme ADEME Santé-Déchets. 98 pp.
9. CSHPF (1998). Risques sanitaires liés aux boues d'épuration des eaux usées urbaines. Paris: Tec et Doc, 107.
10. Culot, M. (2005). Filières de valorisation agricole des matières organiques. Gembloux, Belgique, FUSAGx, Laboratoire d'Ecologie microbienne et d'Epuration des Eaux (LEMEE). 73 pp.
11. Déportes, I., Brunet, H., Aupetitgendre, M., Cauchi, A., Gay, G., Denys, S. et Déléry, L. (2007). Evaluation des risques sanitaires des filières d'épandage des boues de stations d'épuration. Base scientifique de l'évaluation des risques sanitaires relatifs aux agents pathogènes. ADEME, SYPREA, FP2E, INERIS. Rapport des Conventions 03 75 C 0093 et 06 75 C 0071. 97 pp.
12. Fievez, T. (2011). Impacts des apports de digestats sur les sols agricoles. 8èmes Rencontres de la biomasse, Gembloux, ULg Gx agro bio tech, Espace Senghor, 26 octobre 2011, 10 pp.
13. Gendebien, A. (2010). Environmental, economic and social impacts of the use of sewage sludge on land. Brussels, Milieu Ltd, WRc and RPA for the European Commission, DG Environment. Final report. 51 pp.
14. Gerba, C.P. et Smith, J.E. (2005). Sources of pathogenic microorganisms and their fate during land application of wastes. J. environ. Qual. 34, 42-48.

15. Jones, P. et Martin, M. (2003). A review of the literature on the occurrence and survival of pathogens of animals and humans in green compost. Compton, Newbury, Berkshire, UK, Institute for Animal Health. Research Report. 33 pp.
16. Lemunier, M. (2006). Evaluation de la survie de bactéries pathogènes en composts au cours du compostage et du stockage : rôle de la fraction biotique des composts. Revue Francophone d'Ecologie industrielle (Déchets) cahier du n°44, 12-13.
17. Nicholson, F.A., Groves, S.J. et Chambers, B.J. (2005). Pathogen survival during livestock manure storage and following land application. Bioresour. Technol. 96, 135-143.
18. Pell, A.N. (1997). Manure and Microbes : Public and Animal Health Problem ? J. Dairy Sci. 80, 2673-2681.
19. Pereira, B. et Sonnet, P. (2007). La contamination diffuse des sols par les éléments traces métalliques en Région wallonne. Louvain-la-Neuve, Belgique, Université catholique de Louvain. Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du rapport analytique 2006-2007 sur l'état de l'environnement wallon. 27 pp.
20. Sims, J.T. et Wolf, D.C. (1994). Poultry Waste Management : Agricultural and Environmental Issues. Advances in Agronomy. Sparks, D.L. (ed.). Academic Press, vol. 52, 83 pp.
21. Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M. et de Haan, C. (2006). Livestock's long shadow - Environmental issues and options. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 390 pp.
22. Stordeur, V., Lambert, B. et Mahillon, J. (2001). Optimisation de techniques de détection de la flore pathogène dans des boues d'épuration. Université Catholique de Louvain (UCL), Faculté des Sciences Agronomiques, Unité de Microbiologie (Louvain-la-Neuve) - Ministère de la Région wallonne, Direction Générale des Ressources naturelles et de l'Environnement. Rapport final (Convention Région wallonne n° 99/52056). 27 pp + annexes.

CHAPITRE 2.
ESTIMATION DES FLUX DE MATIÈRES FERTILISANTES ÉPANDUES SUR LES TERRES AGRICOLES EN RÉGION WALLONNE

1. PRÉAMBULE

Ce chapitre vise à estimer les flux d'engrais minéraux et engrais de ferme utilisés sur les sols agricoles en Wallonie. Diverses sources d'information et bases de données ont été employées afin de tendre vers cet objectif. Ces différentes sources d'information et bases de données seront successivement passées en revue.

En fonction du contexte, les quantités de matières fertilisantes sont exprimées en quantité de nutriments ou en quantité de matières. Lorsque l'on exprime les chiffres en quantité de nutriments, nous faisons référence aux éléments azotés, phosphatés et potassiques contenus dans les matières. Ils sont exprimés respectivement sous forme de kilogrammes (kg) de N, P_2O_5 et K_2O. Lorsque les matières fertilisantes sont exprimées en quantité de matière, c'est au nombre de kg ou tonnes (T) de matière fertilisante (contenant un certain pourcentage de nutriments) que nous faisons référence.

2. ENGRAIS MINÉRAUX

2.1. Introduction

Le secteur des engrais minéraux en Belgique et en Wallonie est relativement complexe et assez peu connu du point de vue quantitatif. Il n'existe en effet aucun recensement systématique de la consommation d'engrais minéraux comme en France, par exemple (UNIFA, 2012). La détermination des types et des quantités d'engrais minéraux utilisés en Wallonie a dû être estimée par la récolte d'informations et de données provenant de différentes sources d'informations. Certaines données et informations ont été obtenues en libre accès (données IFADATA), d'autres données ont été récoltées par prise de contact et/ou entrevues avec le secteur professionnel des engrais minéraux (Lhoist, Wal.Agri, SCAM, SCAR et RICA).

L'estimation du flux de matières fertilisantes minérales épandues sur les sols agricoles est un exercice délicat. Il est en effet difficile de savoir quelles sont les matières minérales et quelles sont les quantités utilisées localement. Les matières utilisées varient en fonction du prix des engrais, des régions, des affinités et des habitudes des agriculteurs.

C'est particulièrement le cas pour les engrais composés dont la composition centésimale peut varier d'une année à l'autre (selon les prix, la demande). En ce qui concerne les bulks, les teneurs en nutriments peuvent être préparées à la carte pour les agriculteurs par les différents fournisseurs (Wal.Agri, SCAM par exemple). De plus, les matières utilisées dans les bulks peuvent varier considérablement en fonction des prix et des recettes de fabrication des fournisseurs.

Les flux de matières fertilisantes minérales ont été exprimés en quantité de nutriments. C'est en effet sous cette expression que les teneurs en éléments contaminants seront associées par la suite.

Selon le rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon de 2006-2007 (Anonyme, 2007), les quantités moyennes d'azote et de phosphore minéral apportées par hectare de SAU étaient respectivement de 108 kg (N) et 32 kg (P_2O_5) en 2004. Entre 1990 et 2004, on constate une diminution de l'utilisation des engrais minéraux (Figure 7), alors que les rendements des principales cultures sont en hausse. Cela reflète un certain progrès dans l'utilisation raisonnée des engrais minéraux, ceux-ci étant de plus en plus utilisés en complément des engrais de ferme.

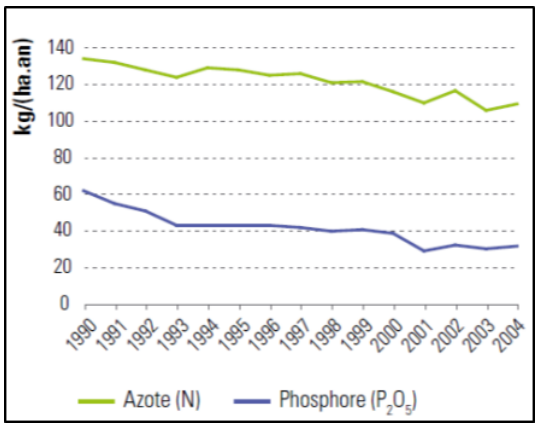

Figure 7. Apports moyens d'engrais minéraux (azote et phosphore) sur les cultures agricoles, en Région wallonne (Anonyme, 2007).

La tendance à la diminution de l'utilisation des engrais minéraux continuera certainement étant donné l'augmentation du prix des matières premières, la meilleure utilisation des engrais de ferme et autres matières de recyclage et l'accompagnement croissant des agriculteurs par les différentes structures d'encadrement de l'agriculture en Région wallonne.

2.2. Types d'engrais minéraux commercialisés en Belgique et en Région wallonne

2.2.1. Sources de données et estimations

a. IFADATA

L'IFA (International Fertilizer Industry Association) est un organisme international regroupant diverses informations sur les engrais minéraux. Parmi d'autres choses, l'IFA collecte des informations sur les quantités d'engrais minéraux consommées pour chaque pays.

Pour la Belgique, les données de l'IFA sont essentiellement basées sur les données de Fertilizer Europe[6] qui réalise des enquêtes sur la consommation des engrais minéraux pays par pays. Les quantités totales de N, P_2O_5 et K_2O sont relativement fiables car elles sont calculées par différence sur base des quantités produites, importées et exportées par pays. Par contre, le détail de la consommation de chaque matière est beaucoup plus délicat à déterminer. Ce sont, en fait, des estimations faites à partir d'autres données agrégées et extrapolées sur base des quantités totales de nutriments calculées (Rousseau, 2012).

Au cours de la période 2000-2009, en Belgique, la consommation totale d'engrais minéraux était de 288 200 T de nutriments. Les engrais minéraux azotés ont compté pour un peu plus de 56 % avec 162 200 T de N, les engrais phosphatés, pour un peu moins de 16 % avec 44 700 T de P_2O_5 et les engrais potassiques pour un peu plus de 28 % avec 81 300 T de K_2O (Tableau 36).

[6] http://www.efma.org/

Tableau 36. Consommation annuelle moyenne belge d'engrais minéraux de 2000 à 2009 (IFA, 2012). Pour les engrais composés, la référence aux éléments (N), (P) ou (K) signifie que l'on considère soit la part azotée, soit la part phosphatée ou soit la part potassique de l'engrais composé.

Nutriment	Matière fertilisante	Milliers de T de nutriments (moyenne 2000-2009)	% du total général
N	Nitrate d'ammonium avec calcium (CAN)[7]	107	37,1
	Solutions azotées	24,6	8,5
	Engrais composés NPK (N)	17,5	6,1
	Sulfate d'ammonium	8	2,8
	Ammoniaque pour application directe	2,1	0,7
	Phosphates d'ammonium (MAP, DAP) (N)	1,1	0,4
	Autres NP (N)	1	0,3
	Urée	0,9	0,3
	Total N	162,2	56,3
P_2O_5	Engrais composés NPK (P)	16,2	5,6
	Autres gammes de P	9,8	3,4
	Superphosphate triple	6,9	2,4
	Phosphates d'ammonium (MAP, DAP) (P)	4,7	1,6
	Engrais composés P K (P)	3,8	1,3
	Autres NP (P)	2,1	0,7
	Superphosphate simple	1,2	0,4
	Total P_2O_5	44,7	15,5
K_2O	Engrais composés N P K (K)	47,5	16,5
	Chlorure de potassium	28,6	9,9
	Engrais composés P K (K)	2,4	0,8
	Autres gammes de K	1,8	0,6
	Sulfate de potassium	1	0,3
	Total K_2O	81,3	28,2
Total général		288,2	100

Les chiffres de la consommation d'engrais minéraux azotés fournis par l'IFA pour la période 2000-2009 sont illustrés à la Figure 8. Les engrais minéraux azotés sont principalement utilisés sous forme simple. La forme simple la plus couramment utilisée est le nitrate d'ammonium avec une consommation annuelle moyenne de 107 000 T de N pour la période 2000-2009. Une autre forme simple, fréquemment utilisée est la solution azotée (consommation moyenne de 24 600 T de N pour la période 2000-2009) dont la consommation est en augmentation ces dernières années. En Belgique, les formes comme le sulfate d'ammonium, l'ammoniaque, le DAP et autres NP et l'urée sont des formes nettement moins utilisées comme source de N que le nitrate d'ammonium et la solution azotée.

[7] Le « CAN » ou Calcum Ammonium Nitrate correspond au nitrate d'ammonium dosant 27 % d'azote. Le terme « Calcium » fait référence à la dolomie et au carbonate de calcium qui sont des matières de charge employées dans la fabrication du nitrate d'ammonium et qui contiennent du $CaCO_3$ et du $MgCO_3$ (pour la dolomie).

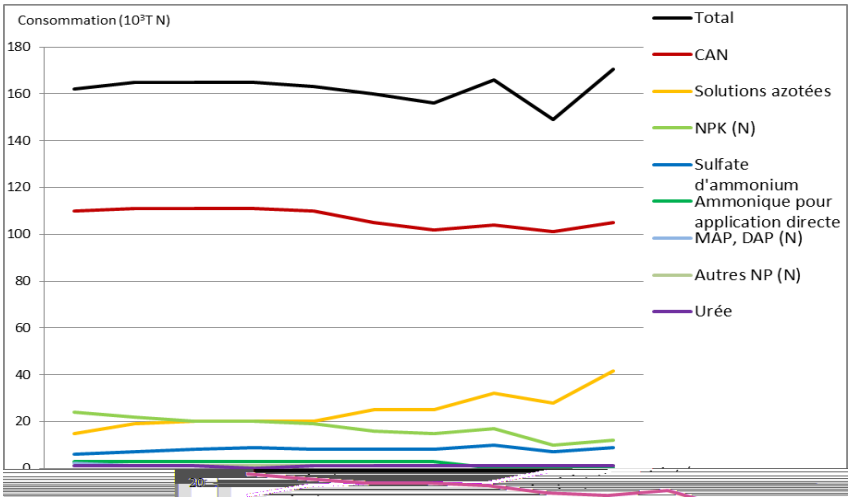

Figure 8. Evolution de la consommation des engrais minéraux azotés par année en Belgique pour la période 2000-2009 (IFA, 2012).

En ce qui concerne les engrais phosphatés, la consommation totale belge se trouve entre 45 et 55 milliers de T de P_2O_5 par an avant 2008 (Tableau 36 et Figure 9). Par rapport aux années précédentes, nous pouvons voir une diminution nette (environ 50 %) de la consommation d'engrais phosphatés en 2008. En Belgique, le phosphore minéral employé se trouve principalement sous forme de composé DAP, PK, NP et surtout NPK avec 16 200 T de P_2O_5 en moyenne pour la période 2000-2009. Les triples superphosphates sont situés en troisième position en termes d'importance (moyenne de 6900 T de P_2O_5 sur 2000-2009).

Figure 9. Evolution de la consommation d'engrais minéraux phosphatés par année en Belgique pour la période 2000-2009 (IFA, 2012).

La consommation belge en engrais potassique minéral varie entre 80 et 90 milliers de T de K_2O par année avant 2008 (Tableau 36 et Figure 10). Comme pour le phosphore, une diminution nette se marque pour l'année 2008 avec une diminution de consommation d'environ 30-40 %. Les deux formes les plus utilisées sont les engrais composés NPK (47 500 T de K_2O en moyenne pour la période 2000-2009) et le chlorure de potassium (28 600 T de K_2O en moyenne pour la période 2000-2009).

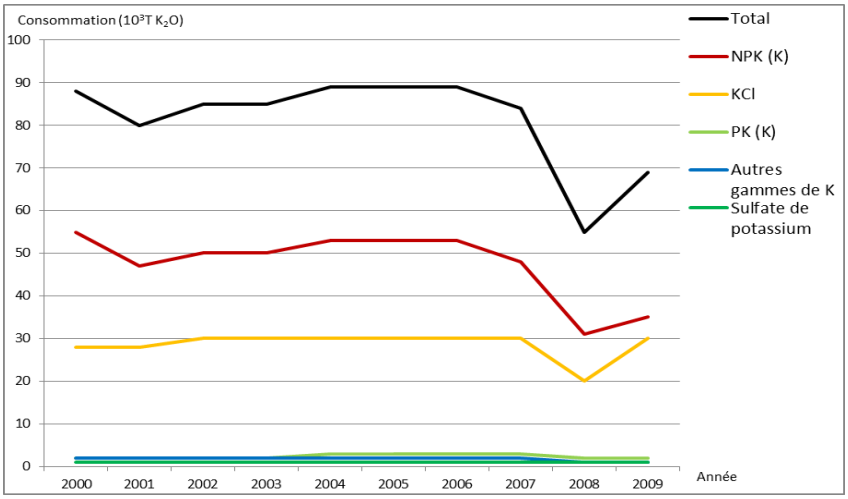

Figure 10. Evolution de la consommation d'engrais minéraux potassiques par année en Belgique pour la période 2000-2009 (IFA, 2012).

Au cours de la période 2000-2009, la consommation d'engrais azotés a été relativement stable (Figure 8) ; par contre, celle des engrais phosphatés et potassiques a fluctué (Figure 9 et Figure 10).

Au regard de ces trois figures, nous constatons une diminution de la consommation d'engrais en 2008. Elle est expliquée par l'augmentation du prix des engrais minéraux. La diminution de consommation se marque principalement sur les engrais phosphatés et potassiques. En effet, alors qu'il est crucial d'apporter des engrais azotés pour l'agriculteur, les stocks du sol en phosphore et potassium permettent de faire temporairement une impasse de fertilisation pour ces deux éléments.

b. Belfertil

Belfertil est une association belge, section professionnelle du groupe Essenscia (Fédération belge des industries chimiques, des matières plastiques et des sciences de la vie). Belfertil regroupe des données des producteurs belges d'engrais minéraux qui leur sont affiliés.

Selon les données issues de Belfertil, sur la période 2007-2010, en Belgique, la consommation totale d'engrais minéraux était de 213 447 T de nutriments. De cette quantité, 78 % était sous forme azotée (166 885 T de N), 8 % sous forme phosphatée (17 193 T de P_2O_5) et 14 % sous forme potassique (29 370 T de K_2O) (Tableau 37). Notons que sur les 166 885 T de nutriments azotés, 150 536 T (soit un peu plus de 90 % du total des nutriments azotés) ont été commercialisés sous forme d'engrais simples.

Tableau 37. Quantités annuelles moyennes d'engrais minéraux commercialisées en Belgique de 2007 à 2010 (Belfertil, 2011).

Nutriment	Matière fertilisante	Milliers de T de nutriments (moyenne 2007-2010)	% du total
N	Engrais N simple	151	71
N	Engrais N total	167	78
P_2O_5	Engrais P total	17	8
K_2O	Engrais K total	29	14
Total		213	100

Les données de l'IFA qui ont été exposées précédemment couvrent la période de 2000 à 2009 tandis que les données disponibles de Belfertil couvrent la période de 2007 à 2010. Afin de pouvoir comparer les données, une moyenne sur les années 2007 à 2009 a été recalculée pour les deux sources de données(Tableau 38).

Tableau 38. Quantités annuelles moyennes d'engrais minéraux commercialisées en Belgique de 2007 à 2009 (IFA, 2012 ; Belfertil, 2011).

Nutriment	Matière fertilisante	Unité des valeurs	Milliers de T de nutriments (moyenne 2007-2009)	
			IFA	Belfertil
N	Engrais N simple	T de N	146	149
N	Engrais N total	T de N	162	165
P_2O_5	Engrais P total	T de P_2O_5	38	17
K_2O	Engrais K total	T de K_2O	69	19
Total			269	201

Si l'on compare les données de l'IFA et de Belfertil pour les années 2007 à 2009 (Tableau 38), nous pouvons voir que les consommations totales d'engrais minéraux sont relativement différentes (269 167 T pour l'IFA contre 201 165 T pour Belfertil). En effet, les quantités d'engrais azotés totales (engrais N total) et simples (engrais N simple) sont relativement proches tandis que les quantités d'engrais phosphatés (38 000 T pour l'IFA et 16 619 T pour Belfertil) et potassiques (69 333 T pour l'IFA et 19 094 T pour Belfertil) sont relativement différentes. Cette différence provient du fait que Belfertil n'est pas exhaustif dans ses statistiques vu qu'il ne reprend que les producteurs qui lui sont affiliés.

Le Tableau 39 exprime la consommation de différentes formes d'engrais minéraux en quantité de matière. Les données de Belfertil nous montrent que la consommation belge d'engrais minéraux est principalement basée sur le CAN (72 %). Exprimés en quantité de matière, les engrais NPK et NK occupent une place secondaire et les engrais NP et PK sont ceux qui sont utilisés le moins fréquemment.

Tableau 39. Quantités annuelles moyennes d'engrais minéraux commercialisées en Belgique de 2007 à 2010 (Belfertil, 2011).

Matière fertilisante	Milliers de T de matière (moyenne 2007-2010)	% du total
CAN	542	72
Engrais NPK/NK	102	14
Autres catégories d'engrais	90	12
Engrais NP (DAP)	11	1
Engrais PK	11	1
Total	756	100

c. Lhoist

Le Groupe Lhoist est un des premiers producteurs mondiaux de chaux et de dolomie, pour l'industrie, l'agriculture et l'environnement. En Wallonie, Lhoist est un fournisseur important d'engrais calcaires.

Lhoist estimait, en 2000, que la quantité d'engrais calcaires utilisée en Wallonie était de 50 000 T d'équivalent CaO (Bulteel, 2011). Les matières épandues étant des produits crus (dolomies, calcaires dont la VN[8] varie de 50 à 60) et cuits (chaux vives et magnésiennes ; VN de 70 à 110). Actuellement, 95 % des engrais calcaires employés en Wallonie sont des produits crus (Hubin, 2011). D'autres engrais calcaires comme les sous-produits calcaires de l'industrie des carrières (VN variant entre 35 et 45) étaient utilisés à hauteur de 13 500 T d'équivalent CaO. En quantité de matière, cela représente 91 000 T de matière (50 000/55*100) pour les engrais calcaires et 33 750 T pour les sous-produits calcaires de l'industrie des carrières.

En ce qui concerne les écumes de sucrerie et de papeterie, environ 60 000 T et 11 500 d'équivalent CaO étaient respectivement épandues en 2000. Pour les écumes de sucrerie, cela représente environ 240 000 T de matière et pour les écumes de papeterie, cela équivaut à 50 000 T de matière.

d. Wal.Agri

Wal.Agri fait partie du groupe AVEVE. Il regroupe les sociétés Brichard, Lebrun et Lottin. Brichart opère dans la région au nord et au sud de la Meuse, Lebrun en Hainaut et Lottin dans la région herbagère liégeoise. Ces sociétés fournissent des produits pour l'agriculture en livraison directe, via les dépôts ou par le canal de commerçants indépendants (Wal.Agri, 2012).

Wal.Agri est le premier fournisseur d'engrais minéraux en Wallonie, avec 40 % des parts de marché (Parmentier, 2011). Selon Roiseux et Dambly (2011), Wal.Agri couvre entre 30 et 50 % des parts de marché du secteur des engrais en Wallonie.

Olivier Roiseux (2011) nous a transmis des données sur les quantités de matière de chaque catégorie d'engrais minéraux qui ont été commercialisées sur la période allant de 2006 à 2010. Le Tableau 40 reprend ces matières et les proportions annuelles moyennes de vente. Les proportions moyennes ont été calculées sur la période 2006-2010. Ces proportions moyennes sont exprimées par rapport au total général de tous les engrais minéraux (% du total général) et par catégorie de nutriment (% du total de la catégorie).

On peut observer, dans ce même tableau, que les engrais azotés simples représentent, en quantité de matière, la majeure partie des ventes avec 53 % du total général. Utilisés sous forme simple, les engrais phosphatés ne représentent que 0,9 % et les engrais potassiques 6,8 %. Les engrais composés représentent la deuxième grosse partie des ventes de Wal.Agri, avec 27,6 %. Les engrais calcaires comptent pour un peu plus de 10 % et les autres types de matières telles que la kiésérite et les amendements organiques représentent ensemble 1,6 % des ventes de matière.

Parmi les engrais azotés, ce sont le nitrate d'ammonium et la solution azotée qui sont les deux engrais majoritaires (ils représentent respectivement 64 % et 33 % des quantités d'engrais azotés simples vendues). Le sulfate d'ammonium ne compte que pour 2 % des ventes d'engrais azotés. La cyanamide calcique, l'urée et le nitrate d'ammoptce

Tableau 40. Répartition moyenne annuelle des quantités de matière minérale commercialisées par Wal.Agri sur la période 2006-2010 (Roiseux, 2011).

Catégorie	Matière fertilisante	% du total de la catégorie	% du total général
N	Nitrate d'ammonium	63,6	33,7
	Solution azotée	33,4	17,7
	Sulfate d'ammoniaque	2,1	1,1
	Cyanamide calcique	0,5	0,3
	Urée	0,3	0,2
	Nitrate de sodium	0,2	0,1
	Total N	**100,0**	**53,0**
P_2O_5	Phosphates naturels	53,7	0,5
	Triples superphosphates	42,3	0,4
	Superphosphates	4,1	0,04
	Total P_2O_5	**100,0**	**0,9**
K_2O	Chlorure de potassium	66,5	4,6
	Kaïnite	21,6	1,5
	Sulfate de potassium	8,0	0,6
	Haspargit	3,9	0,3
	Total K_2O	**100,0**	**6,8**
Engrais composés	NPK bulk	38,4	10,6
	NPK composé	22,7	6,3
	PK poudre	20,0	5,5
	NP (DAP, MAP)	5,8	1,6
	PK composé	4,6	1,3
	PK bulk	3,6	1,0
	NP composé (autre)	2,9	0,8
	NK bulk	1,1	0,3
	NPK poudre	0,2	0,1
	NK poudre	0,2	0,1
	NP bulk	0,2	0,05
	NP (solution 10/34)	0,1	0,04
	NK composé	0,03	0,01
	Total composés	**100,0**	**27,6**
Engrais calcaires	Dolomie, carbonates de calcium	96,5	9,7
	Autres (algues, …)	3,5	0,4
	Total calcaires	**100,0**	**10,1**
Autres	Amendements organiques	79,4	1,3
	MgO (Kiésérite)	20,6	0,3
	Total autres	**100,0**	**1,6**
Total général			**100,0**

L'évolution des quantités totales d'engrais minéraux commercialisées par Wal.Agri au cours des années 2006-2010 est illustrée à la Figure 11. Les données sont exprimées en pourcentage de la variation par rapport à la moyenne des ventes de 2006 à 2010. Nous pouvons voir une diminution nette des ventes entre 2007 et 2008. En 2010, il y a une reprise des quantités commercialisées. Une évolution similaire de la consommation des engrais minéraux au cours des années 2006-2009 a déjà été constatée pour les données issues de l'IFA.

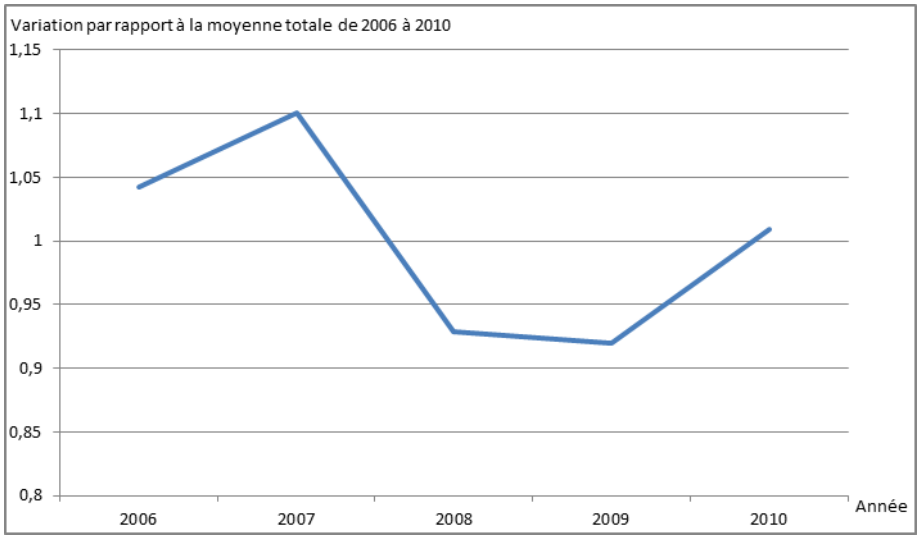

Figure 11. Evolution des ventes annuelles d'engrais minéraux par Wal.Agri sur la période 2006-2010 (Roiseux, 2011).

Comme pour les données issues de l'IFA, ce sont principalement les engrais phosphatés et potassiques qui sont à l'origine de cette variation de la consommation.

Les engrais calcaires ne semblent pas avoir connu de variation particulière et aussi marquée que pour les engrais phosphatés et potassiques au cours de la période 2006-2010 (Figure 12). Cela est logique car la notion d'entretien du pH du sol est relativement bien assimilée par les agriculteurs.

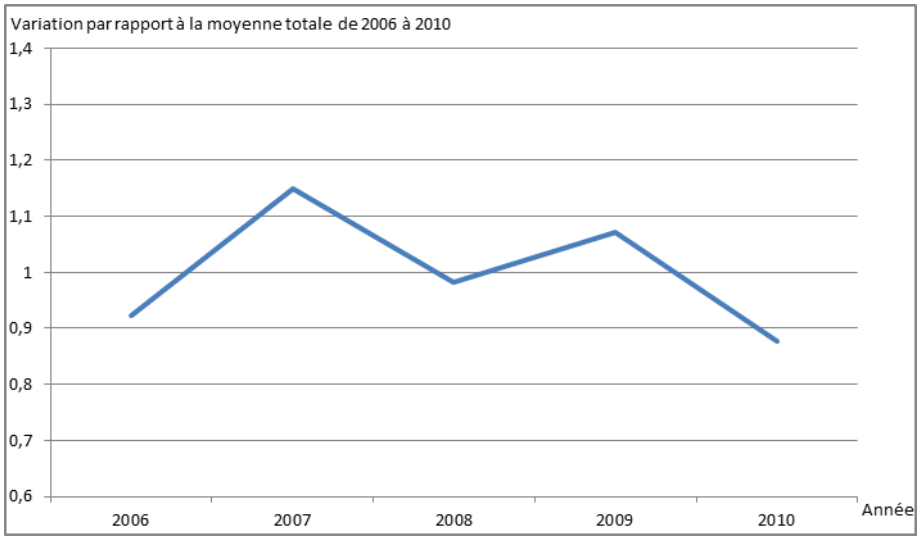

Figure 12. Evolution des ventes annuelles d'engrais minéraux calcaires par Wal.Agri sur la période 2006-2010 (Roiseux, 2011).

e. SCAM

La Société Coopérative Agricole de la Meuse (SCAM) est le second fournisseur d'engrais minéraux en Wallonie avec environ 25 % des parts de marché (Parmentier, 2011). Selon Otjacques (2011), la SCAM représente 30 % du marché des engrais en Wallonie et 95 % des engrais vendus sont écoulés en Wallonie.

Les données fournies par la SCAM proviennent d'informations recueillies lors d'une entrevue avec Benoît Otjacques (2011). Sur base de ces informations, on peut établir la répartition des ventes, en quantités de matière (Figures 7 à 9).

La Figure 13 représente la répartition des engrais minéraux azotés vendus par la SCAM. Le nitrate d'ammonium occupe la première place avec un peu plus de 55 % ; il est suivi par la solution azotée (environ 26 %). Les engrais composés NPK représentent un peu moins de 14 %. L'urée, les engrais composés NP et NK représentent des parts relativement faibles des quantités commercialisées avec 4,3 %, 1,4 % et 0,15 % respectivement.

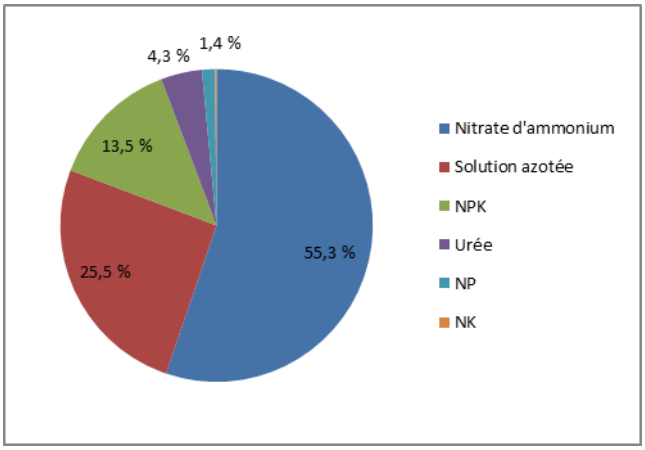

Figure 13. Répartition des ventes de la SCAM entre les différents engrais azotés (Otjacques, 2011).

Selon Otjacques (2011), la SCAM vend principalement les engrais phosphatés sous forme d'engrais composés, et particulièrement sous forme de NPK (60 %) (Figure 14).

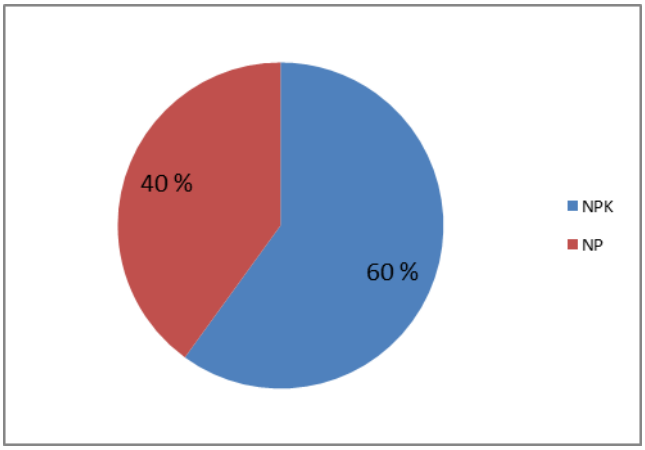

Figure 14. Répartition des ventes de la SCAM entre les différents engrais phosphatés (Otjacques, 2011).

Les engrais potassiques sont vendus à 50 % sous forme simple et à 50 % sous forme composée (Figure 15). Pour les engrais simples, les chlorures de potassium (majoritairement sous forme de KCl 40 %) occupent 90 % de la part des engrais simples vendus. Le reste des engrais simples étant vendu sous forme de kaïnite. Pour les engrais composés, le potassium se trouve dans des engrais de type NPK.

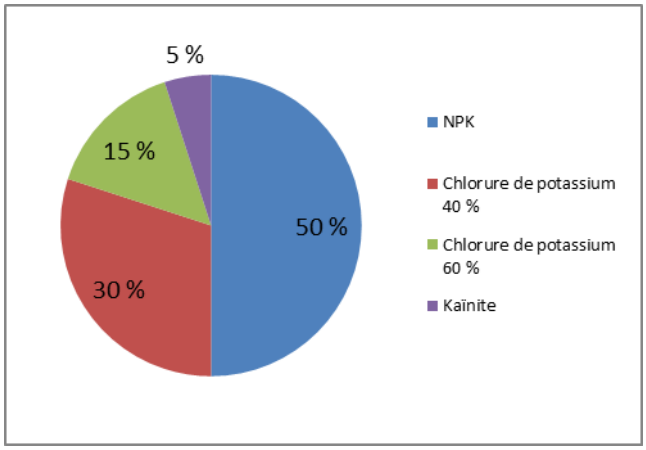

Figure 15. Répartition des ventes de la SCAM entre les différents engrais potassiques (Otjacques, 2011).

f. SCAR

La SCAR (Sociétés Coopératives Agricoles Réunies des régions herbagères) est un autre fournisseur d'engrais en Wallonie. Sa zone d'action se situe dans la région agricole herbagère. La SCAR représente, avec les autres fournisseurs wallons de plus petite taille, les 30-35 % des parts de marchés restantes.

Comme le montre le Tableau 41, la très grande majorité des engrais achetés par la SCAR au cours des années 2008-2010 sont du nitrate d'ammonium (environ 88 % de quantités achetées). Le magnésamon, nitrate d'ammonium enrichi en magnésium, représente 4,6 % des achats en moyenne. Notons que les achats ont été nuls pour cette matière au cours des années 2009 et 2010. La kaïnite, le triple superphosphate, les NPK et le PK représentent des quantités moins importantes.

Tableau 41. Quantités moyennes d'engrais minéraux achetés par la SCAR de 2008 à 2010 (Piret, 2011).

Matière fertilisante	% du total moyen 2008-2010
Nitrate d'ammonium	87,8
Magnésamon	4,6
Kaïnite	2,1
Triple superphosphate	1,8
NPK 13-9-16 + 4 MgO + 7 S	1,5
NPK 15-15-15	1,2
PK 0-7-40	0,6
NPK 15-7-15	0,28
Total	100

2.2.2. Synthèse des données recueillies

Les différentes sources de données qui ont pu être recueillies nous permettent de dégager des tendances plus ou moins précises en ce qui concerne l'utilisation des engrais minéraux en Région wallonne.

Notons qu'au cours de ces dernières années, la consommation d'engrais minéraux a beaucoup fluctué (en fonction des prix), principalement pour les engrais phosphatés et potassiques. C'est pourquoi les tableaux de données ont été présentés par le biais d'une moyenne sur les années

pour lesquelles des données étaient disponibles. Les diminutions de consommation d'engrais minéraux se marquent à partir de 2008 pour les données de l'IFA et Wal.Agri.

L'ordre d'importance entre les différents types d'engrais minéraux (azotés > potassiques > phosphatés) est similaire pour les données issues de l'IFA et de Belfertil, les quantités totales sont cependant inférieures pour Belfertil. Cette différence provient essentiellement de relevés des quantités d'engrais phosphatés et potassiques inférieurs à celui de l'IFA.

D'une manière générale, parmi les différentes matières fertilisantes, les engrais azotés sont majoritairement utilisés, ceci étant lié aux besoins des cultures en azote. Cette tendance est particulièrement marquée pour le fournisseur SCAR dont la zone d'action se trouve principalement dans la région herbagère. De manière générale, les formes d'engrais azotés les plus utilisées sont les formes simples (le nitrate d'ammonium et la solution azotée).

En ce qui concerne les engrais phosphatés et potassiques, l'utilisation sous forme d'engrais simples est relativement limitée. Les apports de phosphore et de potassium se font principalement sous forme d'engrais composés (bulks, engrais complexes et poudres) au travers des formes telles que NP, NK, PK et NPK. Les formes simples phosphatées les plus utilisées sont le phosphate naturel et le triple superphosphate. Pour les engrais potassiques simples, les chlorures de potassium (40 % et 60 %) sont les plus courants.

Les engrais composés sont majoritairement représentés par les NPK et les PK.

Les engrais calcaires les plus utilisés sont des produits crus comme la dolomie (55/40) et le carbonate de calcium.

2.3. Estimation des quantités d'engrais minéraux utilisées en Région wallonne

2.3.1. Données utilisées

a. Parcellaire agricole

Le parcellaire agricole utilisé est issu du relevé de la surface des différentes cultures dans chaque exploitation réalisé dans le cadre de la Politique Agricole Commune (PAC) en 2008. Les données transmises par la Direction de la Protection de Sols (SPW-DPS) décrit le nombre d'hectares de chaque culture recensée en 2008 par commune.

Le parcellaire agricole de 2008 recensait 72 cultures différentes en Wallonie. Nous avons choisi de ne considérer que 23 cultures qui représentent ensemble un peu plus de 99 % de la surface agricole utile (SAU) wallonne. Parmi les 49 cultures non considérées (moins de 1 % de la SAU wallonne), aucune culture ne dépasse 5 % de la SAU au niveau communal.

b. Données issues du RICA

Le RICA est le Réseau d'Information Comptable Agricole. C'est un instrument permettant d'évaluer le revenu des exploitations agricoles et les impacts de la PAC.

Au niveau de la Wallonie, le RICA relève des informations sur les quantités d'éléments N, P et K qui sont appliquées sur les sols agricoles sous forme minérale. Le champ d'observations ne reprend que les exploitations recensées par la Direction générale Statistique et Information économique (SPF Economie-DGSIE) qui peuvent être considérées comme professionnelles. Ces exploitations représentent 2/3 des exploitations wallonnes et plus de 90 % du potentiel de production wallon (Marsin, 2012).

Les données transmises sont une synthèse regroupant les informations disponibles par culture et par région agricole pour les années 2005 à 2009. Pour chaque culture où une information était disponible, les quantités d'engrais minéraux NPK épandues ont été relevées. A partir de cet

échantillon, les régions agricoles et l'ensemble du territoire wallon ont été reconstituée (Marsin, 2012). Le résultat de cette synthèse des données issues du RICA se trouve en annexe 1.

Pour l'estimation des flux, nous avons utilisé les données d'apports moyens en NPK sur la période allant de 2005 à 2009. Les apports en NPK sont détaillés par région agricole pour les 13 cultures les plus importantes en Région wallonne.

Les chiffres fournis pour ces 13 cultures ont permis de fixer des valeurs de fertilisation NPK pour 19 des 23 cultures prises en considération dans le parcellaire agricole. Les libellés des données issues du RICA et du parcellaire agricole ont été associés sur base de leur meilleure correspondance possible (voir annexe 2).

Pour certaines cultures/régions agricoles où il manquait une information sur les apports NPK, nous avons utilisé la moyenne de la Région wallonne. Cette valeur moyenne a été calculée par la Direction de l'Analyse Economique Agricole (SPW-DAEA) en fonction de la dimension économique des exploitations échantillonnées et du nombre d'exploitations correspondantes présentes au niveau de la Région wallonne (Marsin, 2012).

c. Autres données

Quatre cultures n'ont reçu aucune correspondance avec les données de fertilisation minérale issues du RICA. Ce sont les cultures maraîchères (cultures légumières de plein champ), les cultures fruitières pluriannuelles, les tournières enherbées et les pâturages à statut particulier. Pour déterminer les apports d'engrais minéraux sur ces cultures, nous nous sommes basés sur d'autres sources d'informations.

Les tournières enherbées et les pâturages à statut particulier ont été considérés comme ne recevant aucun apport d'engrais minéral.

En Wallonie, les cultures maraîchères regroupent principalement les pois, les haricots verts et les carottes. En 2008, sur 11 697 ha de cultures de légumes en plein air, il y avait 6109 ha de pois de surgélation (52 %), 1965 ha de haricots verts de surgélation (17 %) et 1043 ha de carottes (9 %) (Anonyme, 2010a). Les apports d'engrais minéraux sur ces différentes cultures légumières de plein champ nous ont été communiqués par Abras (2011). Ces apports ont été regroupés de manière pondérée sous le libellé « cultures maraîchères ».

Les cultures fruitières wallonnes sont principalement constituées des pommes et de poires. En 2008, sur 1544 ha de cultures fruitières, il y avait 673 ha de pommes (44 %), 642 ha de poires (42 %) (Anonyme, 2010a). Les apports d'engrais minéraux sur ces cultures fruitières pluriannuelles ont été déterminés sur base d'informations issues de la vitrine de l'agriculture belge (Hulet et Verstraete, 2001). Ces apports ont été regroupés de manière pondérée sous le libellé « cultures fruitières pluriannuelles ».

Aucune distinction sur base des régions agricoles n'a été faite pour les cultures maraîchères et fruitières.

Les valeurs de fertilisation qui ont été déterminées pour les cultures maraîchères et les cultures fruitières pluriannuelles sont présentées au Tableau 42.

Tableau 42. Valeurs de fertilisation des cultures maraîchères et fruitières pluriannuelles utilisées dans le calcul des flux d'engrais minéraux.

Cultures	N (unités)	P_2O_5 (unités)	K_2O (unités)
Maraîchères (cultures légumières de plein champ)	20	62	141
Fruitières pluriannuelles	65	75	63

2.3.2. Méthode de calcul du flux de matières fertilisantes minérales

Les tableaux de données présentés précédemment et les tableaux de correspondances entre ces tableaux (appellés couramment dictionnaires - voir annexe 2) ont été importés dans le logiciel Access pour réaliser les calculs. Les deux tableaux de données utilisés sont le parcellaire agricole de 2008 et la table de fertilisation issue du RICA qui a été complétée par les données issues des autres sources d'information citées au point précédent.

Pour déterminer le flux annuel d'azote, de phosphore et de potassium sur chaque commune wallonne, nous avons fait la somme des apports réalisés sur chaque culture. Etant donné que nous avons considéré environ 99 % de la SAU wallonne, nous avons, pour chaque commune, extrapolé le flux en considérant 100 % de la SAU communale.

2.3.3. Résultats des calculs

a. A l'échelle du territoire de la Wallonie

Les quantités totales d'éléments fertilisants minéraux appliqués sur les sols agricoles de Wallonie sont synthétisées à la Figure 16.

Nous pouvons voir que, par rapport aux autres nutriments, c'est l'azote qui est apporté en plus grande quantité sur les sols agricoles wallons (82 913 T). Les quantités totales de nutriments phosphatés et potassiques appliqués sur les sols sont respectivement de 16 426 T et 31 469 T.

Le total des apports de nutriments sur les sols agricoles wallons s'élève à un peu plus de 130 000 T. Cette valeur se trouve dans un ordre de grandeur cohérent au regard des données issues de l'IFA pour les années de 2005 à 2009, avec 280 500 T de nutriments en moyenne pour l'ensemble de la Belgique.

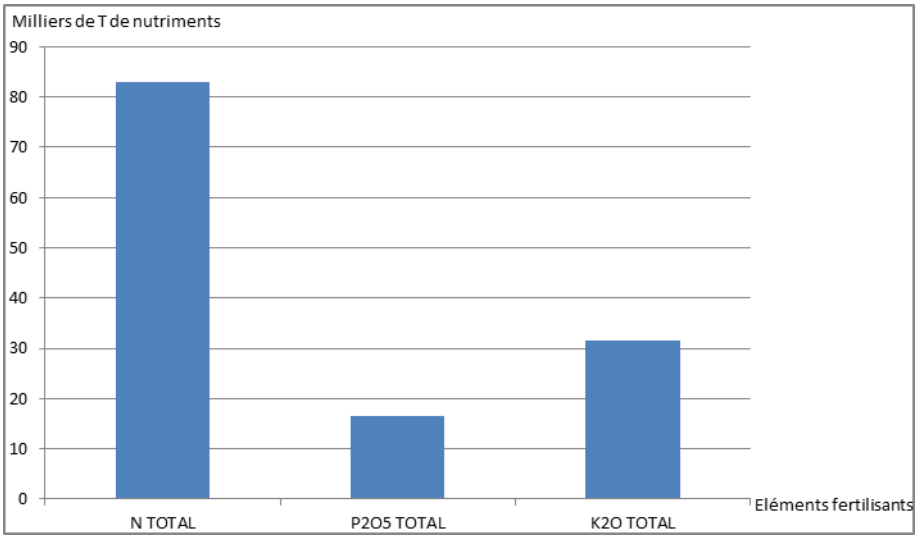

Figure 16. Quantités totales d'éléments fertilisants minéraux appliqués sur les sols agricoles de la Région wallonne.

b. A l'échelle communale

Flux d'azote

Les flux d'engrais minéraux azotés à l'échelle communale sont présentés à la Figure 17. On peut clairement constater une séparation entre la zone polyculture/élevage (dominante culture) et herbagère (dominante prairie).

Les communes de la zone polyculture/élevage reçoivent généralement entre 120 et 150 kg d'azote par hectare et par an. Parmi ces communes, certaines se trouvent dans une catégorie de flux inférieure (Charleroi et Huy), d'autres se trouvent dans la catégorie de flux supérieure (Fleurus, Sombreffe, Villers-la-Ville, Genappe et Grez-Doiceau).

La plupart des communes de la zone herbagère reçoivent des apports en azote minéral situées entre 60 et 90 kg par hectare et par an. Certaines communes de l'est et du sud de la Wallonie se trouvent dans la catégorie d'apports la plus basse (entre 30 et 60 kg N/ha/an). Cela parait assez logique vu que la Région herbagère produit beaucoup d'engrais de ferme et que la Région jurassique a un caractère plus extensif par rapport aux autres régions agricoles.

Toute une série de communes groupées dans la catégorie d'apports intermédiaire entre les deux zones (de 90 à 120 kg N/ha/an) se trouvent à la frontière des zones polyculture/élevage et herbagère.

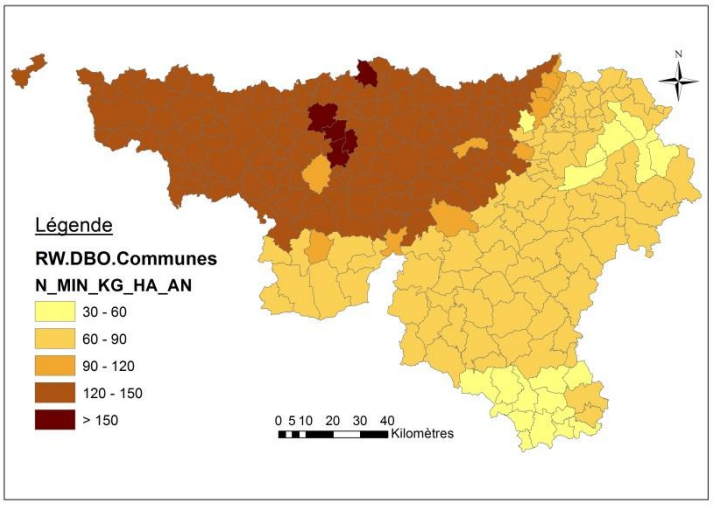

Figure 17. Flux d'éléments fertilisants minéraux azotés exprimés en kg N/ha/an.

Flux de phosphore

Les flux d'engrais minéraux phosphatés sont présentés à la Figure 18. Il semble que les apports de phosphore via les engrais minéraux soient liés aux régions agricoles. L'Ardenne et le Condroz regroupent des communes à flux élevés tandis que la Région herbagère regroupe celles où les flux sont les plus faibles.

Les flux de phosphore minéral plus élevés dans le Condroz et l'Ardenne peuvent être expliqués par le fait que les sols sont moins riches en phosphore disponible pour les plantes dans la partie de la Wallonie se trouvant au sud du sillon Sambre-et-Meuse (Colinet *et al.*, 2005). De plus, alors que les besoins des plantes se trouvent généralement dans un rapport de fertilisation NPK de 2:1:2 dans cette région, les apports d'engrais minéraux se font régulièrement avec un engrais minéral composé dont le rapport de fertilisation NPK est de 2:2:2 (Lambert, 2012). Cela pourrait expliquer

des apports plus élevés en phosphore dans cette région. La région de Mons-Tournai est aussi connue pour apporter des engrais minéraux en plus grande quantité (Lambert, 2012).

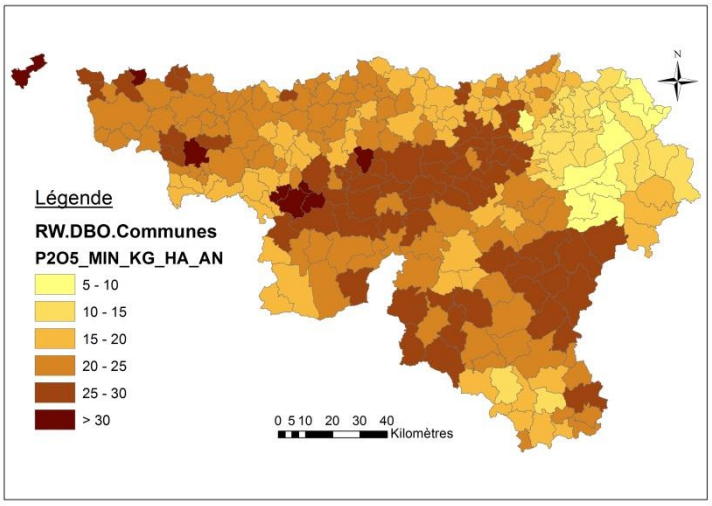

Figure 18. Flux d'éléments fertilisants minéraux phosphatés exprimés en kg P_2O_5/ha/an.

Flux de potassium

Les flux d'engrais minéraux potassiques sont présentés à la Figure 19. Nous pouvons voir un gradient orienté sud-est/nord-ouest.

Les communes pour lesquelles un flux important de potassium minéral a été calculé ont une partie importante de leur SAU occupée par des cultures plus exigeantes en potassium comme la pomme de terre, la chicorée et les cultures légumières de plein champ.

Les apports en zone herbagère sont plus faibles. Les prairies reçoivent en effet moins de potassium que les autres surfaces cultivées.

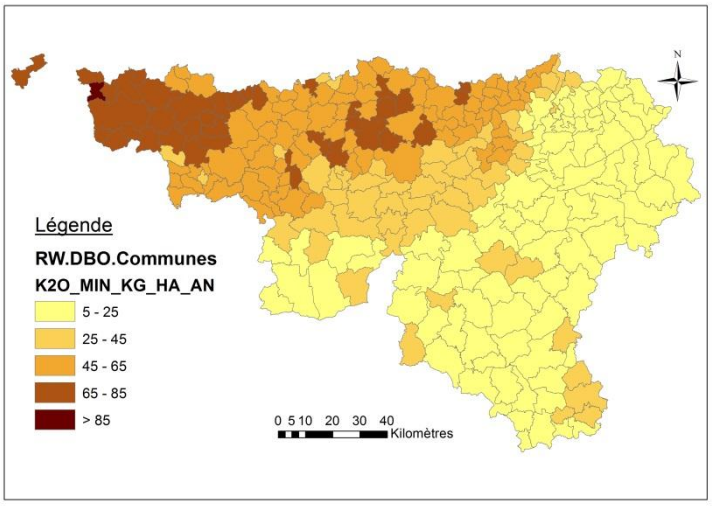

Figure 19. Flux d'éléments fertilisants minéraux potassiques exprimés en kg K_2O/ha/an.

3. ENGRAIS DE FERME

3.1. Introduction

L'estimation des flux d'engrais de ferme épandus sur les sols agricoles wallons a été réalisée en utilisant diverses bases de données. L'exercice d'estimation des flux a été réalisé sur les engrais de ferme majoritairement produits sur le territoire de la Région wallonne.

Dans ce premier exercice, nous avons fait l'hypothèse que l'épandage des engrais de ferme est réalisé de manière pondérée en fonction de la répartition des surfaces agricoles liées aux exploitations productrices.

3.2. Types d'engrais de ferme produits en Région wallonne

La détermination des principales catégories d'engrais de ferme produits en Wallonie a été réalisée en concertation avec l'asbl Agra-Ost (B. Godden et P. Luxen). Nous avons déterminé 13 catégories d'engrais de ferme qui, *a priori*, étaient susceptibles de contenir des teneurs variables en contaminants. Ces catégories prennent en effet en considération les principaux modes d'élevage et d'alimentation rencontrés en Wallonie.

Les catégories d'engrais de ferme principalement produites en Région wallonne et qui ont été fixées dans le cadre du projet sont synthétisées dans le Tableau 43.

Tableau 43. Principales catégories d'engrais de ferme produites en Région wallonne.

Numéro de catégories d'engrais de ferme	Types d'engrais de ferme	Catégorie animale	Spéculation	Zone
1	**Lisier**	Bovin	Lait	Herbagère
2	**Lisier**	Bovin	Lait	Polyculture/élevage
3	**Lisier**	Bovin	Viande	Herbagère
4	**Lisier**	Bovin	Viande	Polyculture/élevage
5	**Lisier**	Porc	Engraissement	Ensemble du territoire
6	**Fumier**	Bovin	Lait	Herbagère
7	**Fumier**	Bovin	Lait	Polyculture/élevage
8	**Fumier**	Bovin	Viande	Herbagère
9	**Fumier**	Bovin	Viande	Polyculture/élevage
10	**Compost**	Bovin	Viande	Herbagère
11	**Compost**	Bovin	Viande	Polyculture/élevage
12	**Fiente**	Volaille	Chair	Ensemble du territoire
13	**Fiente**	Volaille	Production œufs	Ensemble du territoire

3.3. Estimation des quantités d'engrais de ferme produites en Région wallonne

3.3.1. Données utilisées

a. Cheptel wallon

Les informations sur le nombre d'animaux du cheptel wallon par catégorie animale sont issues du système SANITEL. Ce dernier est un système belge de gestion informatisée centralisant de nombreuses informations relatives aux animaux comme l'identification, l'enregistrement et le suivi des animaux (bovins, ovins, caprins, cervidés, volailles) (AFSCA, 2012).

Les données du système SANITEL ont été mises à notre disposition par la DPS sous la forme d'un tableau de données agrégées couvrant l'année 2008. Les données reprennent le nombre d'animaux par catégorie animale et par commune. Le nombre d'animaux de chaque siège d'exploitation a été réparti dans les différentes communes en fonction des surfaces agricoles liées aux sièges d'exploitation.

b. Productions d'engrais de ferme

Les données de production d'engrais de ferme sont issues de la base de données du logiciel VALOR qui se base sur les chiffres renseignés par le Plan de Gestion Durable de l'Azote (PGDA). Le logiciel VALOR a pour objectif de mieux valoriser les engrais de ferme produits en Wallonie. Il permet de calculer la production d'engrais de ferme à partir des caractéristiques des exploitations et propose un plan d'épandage des différentes matières produites.

Deux tableaux de données de production issues de VALOR ont été utilisés pour le projet. Le premier tableau fournit la production des différents engrais de ferme en étable par catégorie animale et par type de stabulation. Le second tableau fournit la « production de lisiers » en prairie par catégorie animale.

c. Types de stabulation

Les données sur les différents types de stabulation utilisés en Wallonie proviennent d'un tableau de données issues du recensement agricole de mai 1996. Cette source d'information précise, par région agricole et catégorie animale, le nombre d'animaux se trouvant sur les différents types de stabulation. Depuis lors, aucun recensement n'a été réalisé en Belgique ou en Wallonie. Ce recensement est donc la seule source de données fiable et exhaustive permettant de déterminer l'importance des différents types de stabulation par catégorie animale et dans chaque région agricole de Wallonie.

3.3.2. Méthode d'estimation de la production des engrais de ferme

a. Détermination du cheptel laitier/viandeux

Les données agrégées issues du système SANITEL ne font pas de distinction entre le cheptel bovin viandeux et laitier. Différentes conventions ont été utilisées pour estimer le nombre de bovins appartenant à chacune de ces deux spéculations.

Tous les bovins mâles de plus de 6 mois ont été considérés comme viandeux.

Pour la catégorie animale « bovins mâles de moins de 6 mois », le nombre d'animaux se trouvant en élevage laitier a été déterminé en appliquant la formule suivante :

$$Nombre\ de\ bovins\ laitiers\ mâles\ de\ moins\ de\ 6\ mois = nombre\ de\ vaches\ laitières * 0{,}5 * \frac{21}{365}$$

La formule ci-dessus suit la logique suivante :

- Il y a une probabilité de 0,5 pour qu'une vache laitière ait un veau.
- Un veau laitier reste 21 jours à l'étable avant d'être abattu.

La répartition des bovins femelles a été faite sur base des deux rapports suivants :

$$Nombre\ de\ bovins\ laitiers femelles = nombre\ de\ bovins\ femelles * \frac{nombre\ de\ vaches\ laitières}{nombre\ de\ vaches\ laitières + nombre\ de\ vaches\ allaitantes}$$

$$Nombre\ de\ bovins\ viandeux\ femelles = nombre\ de\ bovins\ femelles * \frac{nombre\ de\ vaches\ allaitantes}{nombre\ de\ vaches\ laitières + nombre\ de\ vaches\ allaitantes}$$

b. Dictionnaires

Les données décrites ci-dessus ont des origines diverses. Les noms utilisés pour déterminer les catégories animales et les types de stabulations ne correspondent pas entre les différents tableaux de données. Il a donc été nécessaire de créer des dictionnaires permettant une correspondance entre les données. Les dictionnaires utilisés dans les calculs se trouvent aux annexes 3 et 4.

c. Méthode de calcul

Productions en étable

Les tableaux de données et les dictionnaires ont été importés dans le logiciel Access pour réaliser le croisement des informations, les regroupements et les calculs.

A partir du tableau de données fourni par la DPS (cheptel wallon), nous avons croisé chaque ligne (une ligne reprenant l'information sur le nombre d'animaux d'une commune et d'une catégorie animale) avec l'ensemble des stabulations possibles pour cette catégorie animale dans la région agricole considérée (information issue du tableau des types de stabulation). A chacune de ces nouvelles lignes a été associée la proportion d'animaux correspondant au type de stabulation pour la région agricole considérée.

On obtient ainsi, pour chaque enregistrement, le nom de la commune, la catégorie animale, le nombre d'animaux, le type de stabulation et la proportion du nombre d'animaux se trouvant sur ce type de stabulation (tableau du cheptel wallon avec stabulations, Figure 20).

Ce tableau a été associé au tableau de production d'engrais de ferme par animal en étable. Par multiplication (nombre d'animaux*proportion d'animaux sur le type de stabulation donné*temps passé à l'étable sur une année*la production annuelle d'engrais de ferme par animal sur un type de stabulation donné), on obtient, pour chaque stabulation de chaque catégorie animale de chacune des communes de Wallonie, la production d'engrais de ferme en étable.

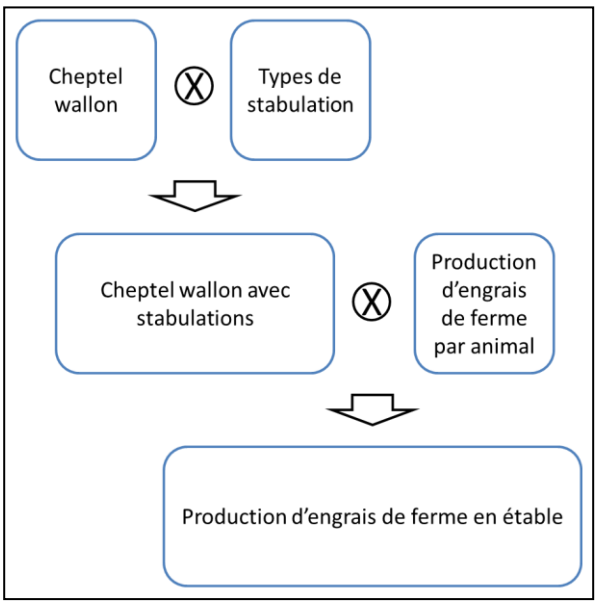

Figure 20. Schéma descriptif des croisements réalisés entre les données relatives à la production d'engrais de ferme en étable.

Restitutions au pâturage

Pour les restitutions de déjection solides et liquides en prairie, nous avons fait une estimation sous forme de lisier. En effet, les restitutions de pissats et de bousas ont été considérées comme formant ensemble du lisier.

Dans le cas des restitutions au pâturage, l'association d'une catégorie animale et d'une région agricole n'a pas été nécessaire. Une simple multiplication entre le nombre d'animaux par catégorie animale du tableau cheptel wallon et du tableau de production de lisier en prairie a permis d'estimer les quantités de déjections animales restituées au pâturage.

Production totale

Les productions en étable et en prairie ont été additionnées pour donner la production totale d'engrais de ferme en Wallonie.

3.3.3. Résultats des calculs

a. A l'échelle du territoire de la Wallonie

Production totale de nutriments

Les quantités totales de nutriments produits sur une année en Wallonie par les engrais de ferme sont synthétisées à la Figure 21.

Nous pouvons voir qu'au niveau de la Région wallonne, la production d'azote et de potassium (K_2O) s'élève respectivement à 78 926 T et 72 435 T. La production de phosphore (P_2O_5) est nettement plus faible avec 34 778 T.

Rappelons que les quantités totales de nutriments apportés annuellement par les engrais minéraux en Wallonie s'élèvent à 82 913 T de N, 16 426 T de P_2O_5 et 31 469 T de K_2O.

Les quantités d'azote produites via les engrais de ferme sont similaires aux quantités apportées sous forme minérale. Cependant, il faut noter que la disponibilité de l'azote provenant des engrais de ferme n'est pas aussi élevée que celle des engrais minéraux. La quantité d'azote produite qui est

réellement disponible pour la plante est à multiplier par un facteur lié au type de matière et à la culture. Ce facteur est généralement compris entre 0,3 et 0,6.

Pour le phosphore et le potassium, les quantités produites par les engrais de ferme sont significativement plus élevées (plus de deux fois plus élevées) que les quantités apportées par les engrais minéraux. Les engrais de ferme sont donc une source majeure de phosphore et de potassium pour les sols agricoles wallons.

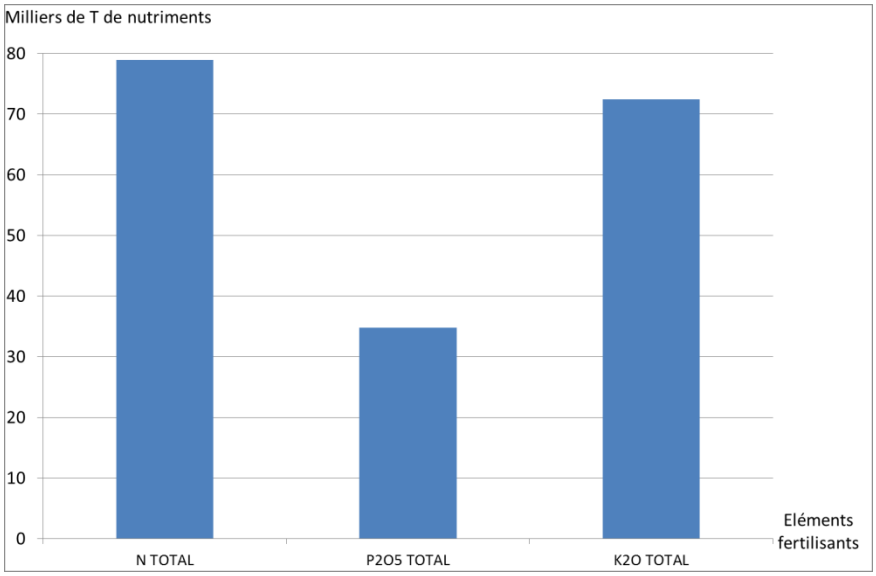

Figure 21. Production annuelle totale d'éléments fertilisants en Wallonie via les engrais de ferme.

Productions en étable

En Wallonie, la production totale d'engrais de ferme en étable s'élève à 1,1 millions de T de matière sèche (TMS) pour l'année 2008. La majorité de cette production est sous forme de fumier (Figure 22). En effet, exprimée en TMS, la production de fumier en étable s'élève à 78,3 % de la quantité totale d'engrais de ferme produite sur l'année 2008. Les fumiers sont principalement issus des spéculations viandeuses avec 65,4 % de la production totale de fumier en Wallonie.

En TMS, les lisiers représentent 17,8 % de la production d'engrais de ferme. La plus grande partie du lisier est produite par les bovins avec 79,7 % de la production. Parmi les lisiers de bovins, 73,2 % de la production se font en zone herbagère.

Les lisiers de porcs représentent 20,3 % de la production totale de lisier wallon (en TMS).

Les fientes de volailles ne représentent que 3,9 % de la production totale d'engrais de ferme en Wallonie.

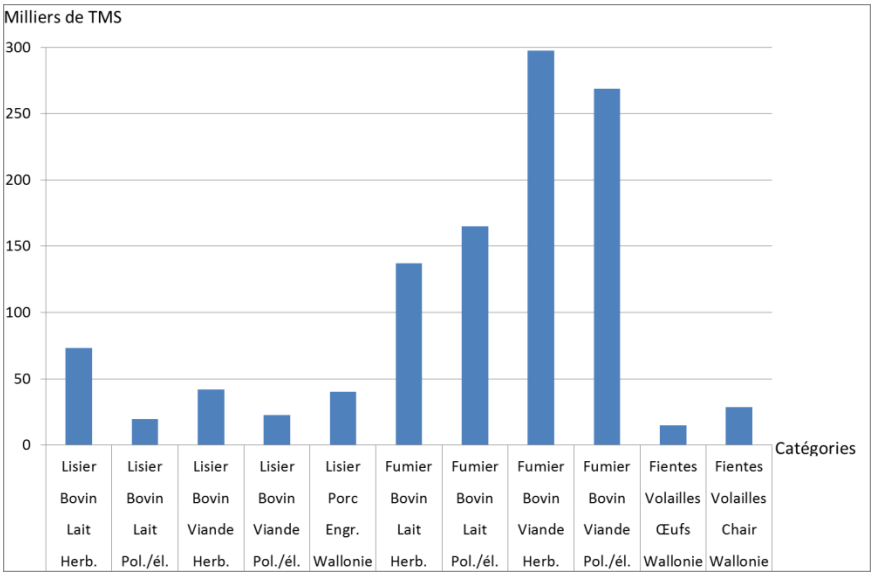

Figure 22. Production wallonne d'engrais de ferme en étable par catégorie fixée.

Restitutions au pâturage

Les restitutions totales de « lisier » sur les pâturages wallons a été estimée à $9{,}0*10^5$ TMS pour l'année 2008.

En TMS, la Figure 23 nous montre que les restitutions de « lisier » au pâturage est plus élevée en zone herbagère qu'en zone polyculture/élevage avec des productions respectives de 57,2 % et 42,8 %.

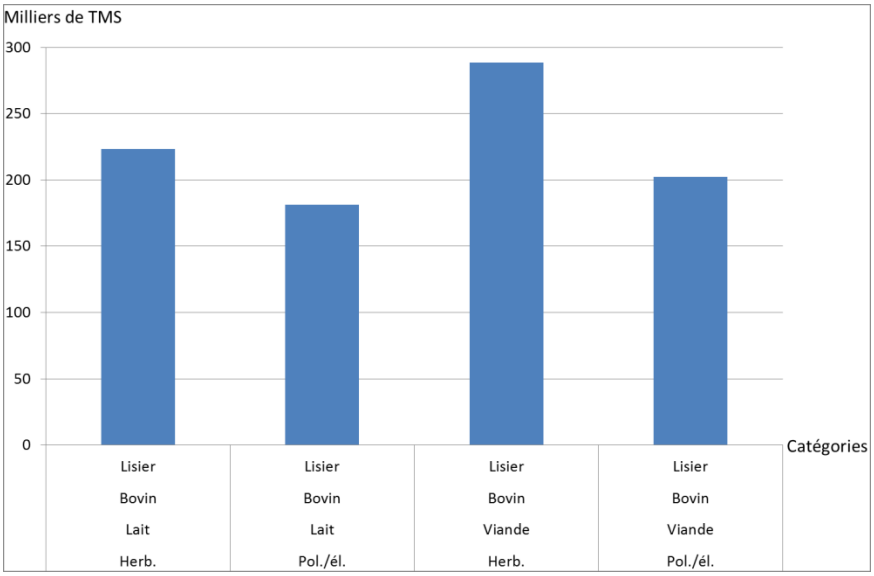

Figure 23. Restitutions au pâturage totales sur en Wallonie par catégorie fixée.

Production totale

La production totale d'engrais de ferme en Wallonie a été estimée en sommant les productions en étable et les restitutions au pâturage. Elle s'élève à deux millions de TMS pour l'année 2008. La Figure 24 nous montre que, si on considère la production en étable et en prairie, la répartition de la production entre les lisiers et les fumiers s'équilibre. En TMS, le fumier ne représente plus que 45 % des productions totales tandis que le lisier passe à 55 %. La répartition de la production de fumier entre les bovins viandeux et laitiers n'a pas changé par rapport à la production en étable.

La répartition de la production de lisier a gardé les mêmes tendances que pour la production en étable bien que la part produite par les bovins soit passée à 96,3 % et que la part du lisier bovin produite en zone herbagère soit descendue à 59,6 %. Notons que la production totale de lisier qui a été calculée provient en grande partie de la production en prairie.

Les fientes de volailles ne représentent plus que 2,2 % de la production totale d'engrais de ferme en Wallonie.

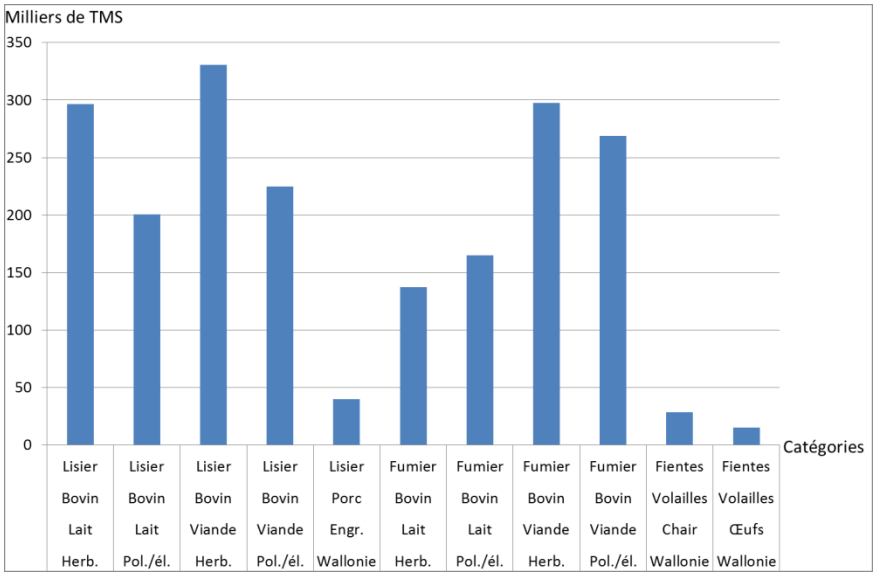

Figure 24. Production totale d'engrais de ferme en Wallonie par catégorie d'engrais de ferme fixée.

b. A l'échelle communale

Les engrais de ferme produits dans les exploitations sont généralement épandus sur les surfaces agricoles liées aux exploitations productrices. Cela nous donne en fait une répartition spatiale des zones les plus productrices d'engrais de ferme par hectare de SAU. Une étape supplémentaire considérant les transferts d'engrais de ferme entre les exploitations et les communes donne une répartition correspondant mieux à ce qui est réellement épandu.

Les résultats des calculs ont été synthétisés sous forme de cartes. Par commune, les TMS de chaque catégorie d'engrais de ferme ont été additionnés. Les flux au niveau communal sont illustrés aux figures 25 à 29.

Quantités d'engrais de ferme produites

Nous pouvons voir à la Figure 25 que la plupart des communes de la zone herbagère produisent des quantités relativement élevés d'engrais de ferme (de 2 à 5 TMS/ha/an). Dans cette zone, se trouvent les communes avec les productions d'engrais de ferme plus importantes (de 4 à 6 TMS/ha/an). Notons que dans la zone correspondant aux arrondissements de Mouscron, Tournai,

Ath, Soignies et Mons se trouvent des communes dont les productions sont relativement élevées et que les communes de Seraing et Comines-Warneton dépasse toutes les autres communes wallonnes avec des productions respectives de 5,19 et 4,86 TMS par hectare et par an.

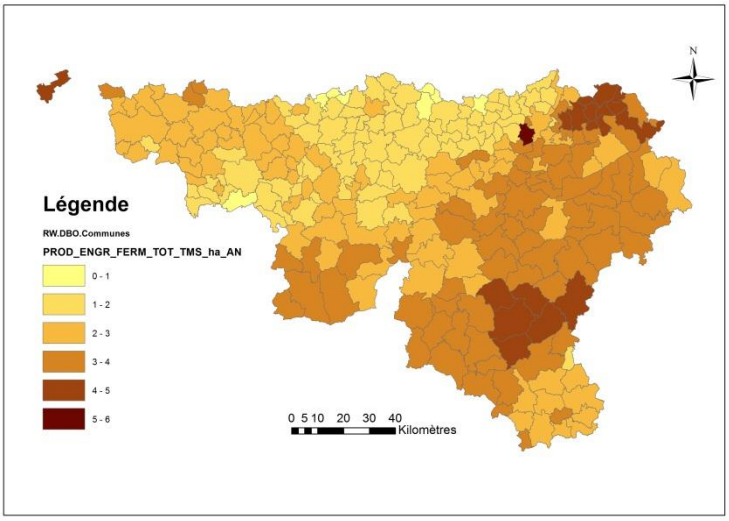

Figure 25. Quantités d'engrais de ferme produites en Région wallonne exprimées en TMS/ha/an.

Quantités d'azote produites

On peut observer à la Figure 26 la répartition des quantités d'azote produites via les engrais de ferme. Globalement, l'importance des productions d'azote est répartie de manière similaire à celles exprimées en TMS. Deux communes se trouvent dans une catégorie de production supérieure en Région herbagère (Seraing et Dison). Encore une fois, Comines-Warneton se trouve dans la catégorie la plus élevée avec un flux de 242 kg d'azote produit par hectare et par an. Etant donné les quantités importantes de N produites dans la commune de Comines-Warneton, une partie des engrais de ferme produits est exportée.

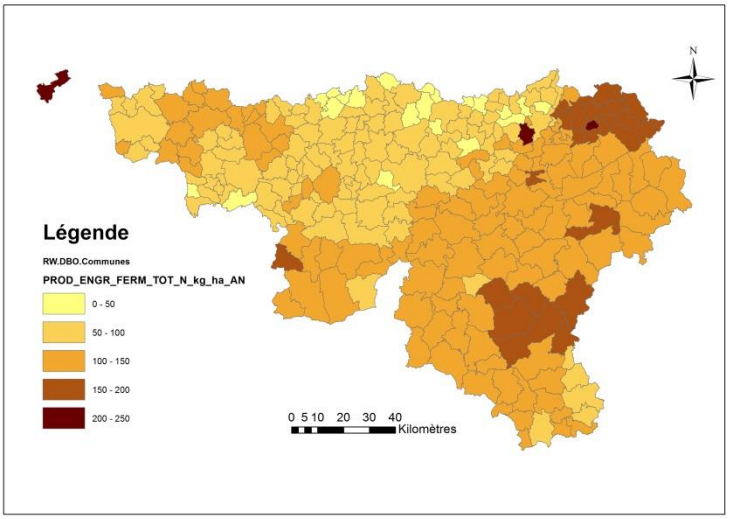

Figure 26. Quantités d'azote produites en Région wallonne via les engrais de ferme exprimées en kg N/ha/an.

Quantités de phosphore produites

Les quantités de phosphore produites par commune via les engrais de ferme sont illustrées à la Figure 27. On peut observer un gradient globalement similaire au précédent mais avec la commune de Comines-Warneton se distinguant de manière plus prononcée (182 kg P_2O_5/ha/an). Les élevages de porcs sont en effet très courants dans cette commune. Les engrais de ferme issus de ces exploitations ont un rapport N-P-K plus riche en phosphore.

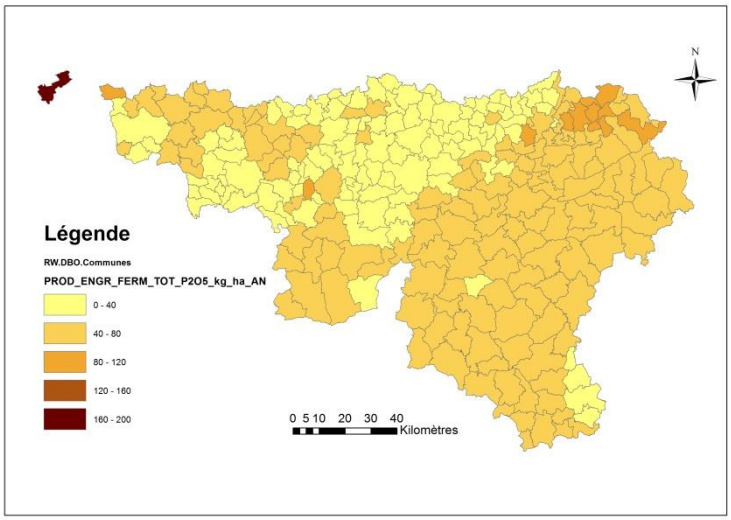

Figure 27. Quantités de phosphore produites en Région wallonne via les engrais de ferme exprimées en kg P_2O_5/ha/an.

Quantités de potassium produites

La Figure 28 illustre les quantités de potassium produites via les engrais de ferme dans les différentes communes wallonnes. Le même gradient (sud-est/nord-ouest) vu dans les cartes précédantes est observé. Différentes communes se retrouvent dans des catégories supérieures en région herbagère (Limbourg, Dison, Thimister-Clermont, Aubel et Seraing). Comines-Warneton (163 kg K_2O/ha/an) dépasse toutes les autres communes en région polyculture/élevage.

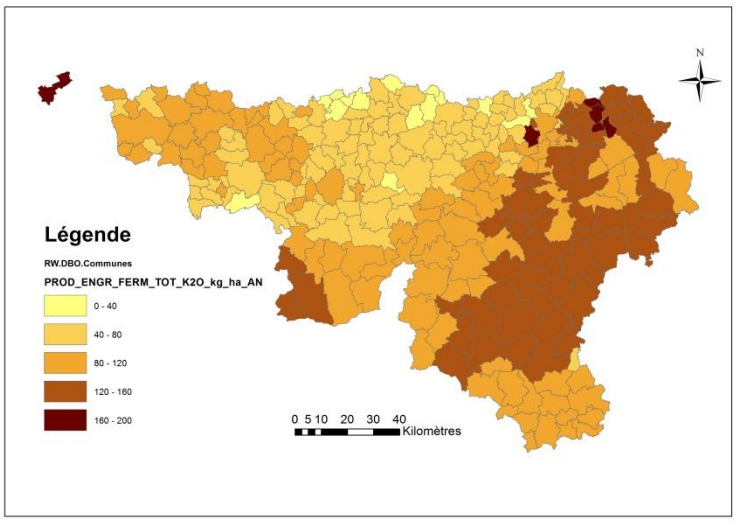

Figure 28. Quantités de potassium produites en Région wallonne via les engrais de ferme exprimées en kg K_2O/ha/an.

Quantités d'engrais de ferme épandues

Les quatre cartes présentées ci-dessus prennent uniquement en considération les quantités d'engrais de ferme produites dans chaque commune wallonne. Si on prend en compte les échanges d'engrais de ferme qui ont été effectués entre les communes wallonnes au cours de l'année 2008, nous pouvons voir, à la Figure 29, que la répartition des zones de production est similaire à celle présentée à la Figure 25. Notons que la classe de quantités supérieure (5 à 6 TMS/ha/an) à disparu, la commune de Comines-Warneton est passée de 4,86 à 2,92 TMS/ha/an. Cette diminution importante est très certainement liée à la répartition des surplus produits dans les communes se trouvant dans les arrondissements de Mouscron, Tournai, Ath, Soignies et Mons.

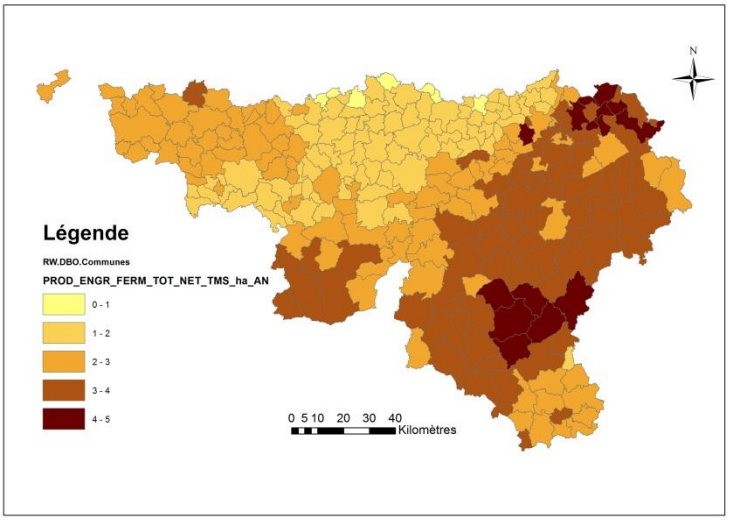

Figure 29. Quantités d'engrais de ferme potentiellement épandues en Région wallonne via les engrais de ferme exprimées en TMS/ha/an

4. CONCLUSIONS

Au cours de la réalisation de cette partie du travail, nous avons pu mettre en évidence la difficulté que comporte l'exercice d'estimation des flux de matières fertilisantes sur les communes de Wallonie. Il n'est en effet pas du tout aisé de localiser précisément où sont épandues les différentes matières. Il a donc été nécessaire, pour cette première approche, de réaliser une estimation à partir des informations qui ont pu être recueillies.

En ce qui concerne l'utilisation des engrais minéraux, nous avons vu qu'il existe une grande variété de matières en Wallonie. L'analyse des données recueillies montre qu'il n'est pas évident d'obtenir des données fiables et représentatives assez détaillées pour identifier précisément toutes les matières utilisées. L'utilisation des matières minérales varie au cours du temps, en fonction des prix, mais aussi dans l'espace, en fonction des besoins des cultures, des sols et des habitudes des agriculteurs. Vu la complexité de l'exercice, l'approche retenue pour l'estimation des flux de contaminants a été d'exprimer les flux d'engrais minéraux en quantité de nutriments par hectare et par année. Cela permettra par la suite de ne considérer qu'un seul nutriment à la fois et ainsi, de contourner la complexité des engrais composés.

En ce qui concerne la production des engrais de ferme, le nombre de matières est plus limité. L'exercice d'estimation des flux de matière a nécessité, comme pour les engrais minéraux, certaines approximations. Nous avons pu voir que la production de nutriments via ces matières est relativement importante, en particulier pour le phosphore et le potassium. Certaines régions de Wallonie sont plus productrices d'engrais de ferme que d'autres régions. C'est en Ardenne et dans le Hainaut occidental que se concentrent les productions. L'Ardenne, le plateau de Bastogne et le

Pays de Herve sont ainsi particulièrement concernés. Pour le Hainaut occidental, la commune de Comines-Warneton dépasse généralement toutes les autres communes.

5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

5.1. Documents

Anonyme (2007). *Rapport analytique sur l'état de l'environnement wallon 2006-2007.* Namur, Ministère de la Région Wallonne. 733 pp.

Anonyme (2010a). *Evolution de l'économie agricole et horticole de la Région wallonne 2008-2009.* SPW, Direction générale opérationnelle de l'Agriculture, des Ressources naturelles et de l'Environnement, Département de l'Etude du Milieu naturel et agricole, Direction de l'Analyse économique agricole. Rapport, 77 pp.

Colinet, G., Toussaint, B., Laroche, J., Goffaux, M.J., Martinez, M. and Oger, R. (2005). *Base de données sols de Requasud - Deuxième synthèse.* FUSAGx, Laboratoire de Géopédologie (Gembloux), Laboratoire d'Ecologie des Prairies (Bastogne), Cellule de coordination de Requasud (Gembloux), CRA-W, Section Biométrie, Gestion des données et Agrométéorologie (Gembloux). Note interne, 36 pp.

Hulet, H. and Verstraete, P. (2001). *Vitrine de l'agriculture belge.* Ministère des Classes moyennes et de l'Agriculture, Centre de Recherches agronomiques (CRA-Gembloux), Institut Royal Belge pour l'Amélioration de la Betterave (IRBAB), Centre agricole betteraves chicorées, Centre agronomique de recherches appliquées du Hainaut (CARAH), Centre Interprofessionnel maraîcher (CIM), Centre d'essais horticoles de Wallonie (CEHW). 76 pp.

5.2. Communications personnelles

Abras Morgan (2011). Attaché scientifique. Fertilisation azotée dans les cultures de légumes. Centre wallon de Recherches agronomiques.

Belfertil (2011). Communication personnelle de données confidentielles de Belfertil par Jean-Marie Parmentier. Responsable engrais minéraux. Société Rosier (sa).

Bulteel Michel (2011). Responsable Ventes Applications Environnement Benelux. Société Lhoist (sa).

Cappellen Olivier (2011). Direction générale opérationnelle de l'Agriculture, des Ressources naturelles et de l'Environnement (DGARNE), Département de l'Etude du milieu naturel et agricole (DEMNA), Direction de l'Analyse économique agricole (DAEA).

Dambly Bernard (2011). Responsable engrais minéraux. Société Wal.Agri.

Dambly Bernard (2012). Responsable engrais minéraux. Société Wal.Agri.

Hubin Marcel (2011). Directeur Activités Chimie et Industrie. Société Lhoist (sa).

Lambert Richard (2012). Directeur du Centre de Michamps (asbl).

Marsin Jean-Marie (2012). Direction générale opérationnelle de l'Agriculture, des Ressources naturelles et de l'Environnement (DGARNE), Département de l'Etude du milieu naturel et agricole (DEMNA), Direction de l'Analyse économique agricole (DAEA).

Otjacques Benoît (2011). Communication personnelle de données confidentielles. Responsable engrais. Société Coopérative Agricole de la Meuse (SCAM) (scrl).

Parmentier Jean-Marie (2011). Responsable engrais minéraux. Société Rosier (sa).

Piret Pierre-Yves (2011). Responsable engrais minéraux et alimentation animale. Sociétés Coopératives Agricoles Réunies des régions herbagères (SCAR) (sa).

Roiseux Olivier (2011). Responsable engrais minéraux. Société Wal.Agri.

Rousseaux Olivier (2012). International Fertilizer Industry Association (IFA).

Vancutsem Bertrand (2012). Gestionnaire du dépôt de Mourcourt. Société Wal.Agri.

5.3. Sites web

AFSCA (2012). SANITEL. URL : http://www.favv.be/productionanimale/animaux/sanitel/#sanitrace, consulté le 06/03/2012.

UNIFA (2012). Les livraisons sur la campagne en cours. URL : http://www.unifa.fr/le-marche-en-chiffres.html, consulté le 10/01/2012.

IFA (2012). IFADATA. URL : http://www.fertilizer.org/ifa/ifadata/search, consulté le 11/01/2012.

AVEVE (2012). URL : http://www.aveve.be/Frans/Activit %C3 %A9s/Nossoci %C3 %A9t %C3 %A9s/tabid/4385/Default.aspx#Wal.Agri, consulté le 4/01/2012.

Fertilizer Europe (2012). Nitrogen Fertilizer Consumption in EU 27 countries 2006/07 (agric. use). URL : http://www.fertilizerseurope.com/documents/file/statistics/consumption/Nitrogen %20Fertilizer %20Consumption %20in %20EU %2027 %20countries %202006 %2007.jpg, consulté le 26/01/2012.

CHAPITRE 3.
TENEURS MOYENNES D'ETM ET DE CTO DANS LES MATIÈRES FERTILISANTES UTILISÉES EN RÉGION WALLONNE

1. RAPPEL DES CONTAMINANTS IDENTIFIÉS DANS LES MATIÈRES FERTILISANTES

La revue bibliographique sur les teneurs en contaminants dans les matières fertilisantes a mis en évidence le grand nombre d'ETM et de CTO se trouvant potentiellement dans ces matières.

En ce qui concerne les engrais minéraux, les ETM qui avaient été mis en évidence à des concentrations diverses dans toutes les matières minérales sont l'As, le Cd, le Cr, le Cu, le Hg, le Mo, le Ni, le Pb, le Se et le Zn. Pour les engrais minéraux phosphatés, des ETM supplémentaires ont été identifiés : ce sont le Sb, Ra, U, V et les éléments de terres rares[9]. Les investigations menées pour les CTO dans les matières minérales ont seulement mis en évidence la présence potentielle de composés dioxiniques.

Parmi toutes les matières minérales, ce sont les engrais phosphatés qui contiennent des ETM en plus grandes quantités. C'est, en effet, dans ces matières minérales que se trouvent l'As, le Cd, le Cr, le Mo, le Pb, le Se et le Zn à des teneurs plus élevées.

L'oxyde de magnésium est une matière minérale qui contient de plus fortes teneurs en Cu et Ni. Le Hg est un ETM qui se trouve souvent en très faibles quantités dans les matières fertilisantes minérales.

Pour les engrais de ferme, les ETM potentiellement présents identifiés sont les suivants : As, Ba, Be, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Li, Mo, Ni, Pb, Se, Sr, V et Zn. Les CTO présents peuvent être des substances actives d'antibiotiques[10], les HAP, les PCB, les phénols, phtalates, phosphates triesters, cis- et trans-isosafrol, LAS et des dioxines.

Selon la revue bibliographique, les lisiers de bovins et de porcs tendent à être plus concentrés en ETM que les fumiers. Les excréments de porcs ont des teneurs plus élevées en Cu et Zn, dépassant les limites autorisées dans les matières recyclables de classe B2 d'un facteur avoisinant 3. Le Cd, le Pb et le Hg se trouvent à des concentrations supérieures dans les excréments de bovins. Le Co, le Li, le Mo et le Se se trouvent plus particulièrement dans les excréments de porcs. L'As, le Cr, le Sr et le V se trouvant quant à eux plutôt dans les excréments de volaille.

2. PLAN D'ÉCHANTILLONNAGE

2.1. Engrais minéraux

La détermination du plan d'échantillonnage des engrais minéraux se base sur les données fournies par Wal.Agri. Ce sont en effet les données les plus précises et les plus représentatives que nous avons pu recueillir pour la Wallonie. A partir de la liste des engrais minéraux vendus par Wal.Agri, nous avons déterminé le nombre d'échantillons à prélever par matière minérale pour l'analyse chimique. Nous avons essayé de considérer un maximum de matières. Pour fixer le nombre d'échantillons à prélever, différents critères ont été utilisés. Les critères étaient la quantité moyenne d'engrais minéraux vendue au cours de la période 2006-2010, les teneurs potentielles moyennes en ETM dans les matières (selon les teneurs de la littérature) et le manque de données provenant de la littérature. La teneur moyenne en ETM a été calculée en faisant une moyenne des teneurs de 10 ETM[11] provenant de la littérature.

Le Tableau 44 reprend la répartition des quantités moyennes annuelles commercialisées par Wal.Agri sur la période 2006-2010, les teneurs moyennes en ETM calculées et le nombre d'échantillons qui ont été fixés pour l'échantillonnage.

[9] Ce, Dy, Er, Eu, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pm, Pr, Sm, Tb, Tm, Y et Yb.
[10] La sulfadiazine, la doxycycline l'oxytetracycline amoxicilline sont des composés antibiotiques couramment utilisés dans l'alimentation et les traitements vétérinaires des animaux d'élevage.
[11] As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, Zn.

Tableau 44. Nombre d'échantillons d'engrais minéraux fixés pour la campagne d'échantillonnage.

Catégorie	Matière fertilisante	Répartition annuelle moyenne (2006-2010), en %	Teneur moyenne en ETM	Nombre d'échantillons fixés
N	Nitrate d'ammonium	33,7	2,9	4
	Solution azotée	17,7	?	4
	Sulfate d'ammoniaque	1,1	2,0	2
	Cyanamide calcique	0,3	4,3	2
	Urée	0,2	0,9	2
	Nitrate de sodium	0,1	1,3	0
P2O5	Phosphates naturels	0,5	49,2	4
	Triple superphosphates	0,4	96,9	4
	Superphosphates	0,04	33,0	4
K2O	Chlorure de potassium	4,6	1,5	4
	Kaïnite	1,5	?	4
	Sulfate de potassium	0,6	2,8	2
	Haspargit	0,3	?	2
Engrais composés	NPK bulk	10,6	29,1	0
	NPK composé	6,3	29,1	4
	PK poudre	5,5	43,5	2
	NP (DAP, MAP)	1,6	95,8	4
	PK composé	1,3	43,5	4
	PK bulk	1,0	43,5	0
	NP composé (autre)	0,8	95,8	2
	NK bulk	0,3	4,8	0
	NPK poudre	0,1	29,1	0
	NK poudre	0,1	4,8	0
	NP bulk	0,05	95,8	0
	NP (solution 10/34)	0,04	95,8	2
	NK composé	0,01	4,8	0
Engrais calcaires	Chaux	9,7	8,9 - 16,7	4
	Autres (algues, …)	0,4	?	2
Autres…	Amendements organiques	1,3	?	0
	MgO (Kiésérite)	0,3	22,3	2
Total				64

Les engrais composés sous forme de bulk n'ont pas été prélevés car ils sont formés par mélange de matières simples. La réalisation d'un prélèvement représentatif de ce type d'engrais composé n'est pas aisée car la répartition spatiale des engrais simples dans le bulk peut être relativement hétérogène. La somme des teneurs en contaminants des matières simples composant les bulks donne la teneur en contaminants dans les bulks.

Les engrais composés sous forme de poudre n'ont pas été échantillonnés car leur composition est supposée être la même que pour les engrais composés sous forme de granulés. Le PK poudre a été échantillonné car des fientes calcinées de poules entrent dans sa composition.

Certaines matières n'ont pas été échantillonnées car les quantités vendues étaient relativement faibles. Les amendements organiques n'ont pas été prélevés car, bien qu'utilisés en faibles quantités il y a quelques années, les quantités utilisées sont devenues nulles sur 2009-2010.

2.2. Engrais de ferme

Comme mentionné précédemment (chapitre 2), les différentes catégories d'engrais de ferme échantillonnées ont été fixées en concertation avec l'asbl Agra-Ost. La répartition du nombre d'échantillons à prélever par catégorie a été déterminée de manière proportionnelle au nombre de tonnes de matières fraîches (TMF) d'engrais de ferme produit (estimé par calcul) sur le territoire wallon. Un nombre de 60 échantillons d'engrais de ferme avait été fixé en fonction du budget disponible pour les analyses chimiques.

Le nombre d'échantillons fixés pour chaque catégorie d'engrais de ferme est présenté au Tableau 45. Nous avons réparti le nombre d'échantillon à prélever en fonction des productions d'engrais de ferme calculées. Ainsi, au moins deux échantillons étaient prévus pour chaque matière sauf pour les fientes de volailles. Nous avons choisi d'allouer deux échantillons pour chacune des deux catégories de fientes de volaille et de diminuer le nombre d'échantillons pour les catégories les plus représentées. Les quantités de fumier composté de bovin viandeux produites n'étant pas estimables par calcul, nous avons arrondi vers le bas le nombre d'échantillons de catégories comme les fumiers de bovin viandeux (entre autres) pour allouer un échantillon dans les deux catégories de fumier composté.

Tableau 45. Nombre d'échantillons qui ont été déterminés par catégorie d'engrais de ferme fixée.

N° de catégories d'engrais de ferme	Types d'engrais de ferme	Catégorie animale	Spéculation	Zone	Nombre d'échantillons calculés	Nombre d'échantillons fixés
1	**Lisier**	Bovin	Lait	Herbagère	8,9	8
2	**Lisier**	Bovin	Lait	Polyculture/élevage	5,3	5
3	**Lisier**	Bovin	Viande	Herbagère	8,5	7
4	**Lisier**	Bovin	Viande	Polyculture/élevage	6,1	5
5	**Lisier**	Porc	Engraissement	Ensemble du territoire	2,4	2
6	**Fumier**	Bovin	Lait	Herbagère	4,3	5
7	**Fumier**	Bovin	Lait	Polyculture/élevage	5,1	5
8	**Fumier**	Bovin	Viande	Herbagère	9,9	9
9	**Fumier**	Bovin	Viande	Polyculture/élevage	8,6	8
10	**Compost**	Bovin	Viande	Herbagère		1
11	**Compost**	Bovin	Viande	Polyculture/élevage		1
12	**Fiente**	Volaille	Chair	Ensemble du territoire	0,7	2
13	**Fiente**	Volaille	Production œufs	Ensemble du territoire	0,2	2
Total					60	60

3. PRÉLÈVEMENT DES ÉCHANTILLONS ET ANALYSES

3.1. Engrais minéraux

3.1.1. Matières échantillonnées

Dans la mesure du possible, les échantillons d'engrais minéraux à prélever ont été répartis chez Wal.Agri et à la SCAM qui sont les deux plus gros fournisseurs d'engrais minéraux en Wallonie. Ils regroupent ensemble environ 70 % du marché des engrais minéraux en Wallonie. Certains échantillons ont été fournis par d'autres organismes comme Rosier, Promogro et le CRA-W. La réalité du terrain a fait que le NP solution 10/34 n'a pas pu être échantillonné car aucun stock n'était disponible dans les dépôts de Wal.Agri. Pour les engrais composés, nous avons prélevé les matières qui sont actuellement vendues et disponibles dans les dépôts des fournisseurs.

Les organismes dans lesquels ont été prélevés les échantillons d'engrais minéraux, le nombre d'échantillons prélevés ainsi que leur composition centésimale sont présentés au Tableau 46.

En ce qui concerne le nitrate d'ammonium, nous avons rencontré deux types de matière. Une matière était blanche et l'autre était grise (et contenait 4 % de MgO en plus). Nous avons pris quatre échantillons de nitrate d'ammonium blanc (le plus courant) et deux échantillons pour le nitrate d'ammonium avec 4 % de MgO. Pour le chlorure de potassium, nous avons pris quatre échantillons de KCl 40 % et quatre échantillons de KCl 60 %.

Pour les « chaux », quatre échantillons ont été prélevés pour la dolomie et quatre pour le carbonate de calcium.

Pour les engrais composés, différentes matières ont été rencontrées ; pour les NPK, nous avons échantillonné les matières vendues cette année par la SCAM et Wal.Agri ; ce sont respectivement le 5-10-30 et le 18-6-5. Deux échantillons de chacune de ces matières ont été prélevés. Pour les PK composés, nous avons prélevé les formules 0-11-11, 0-7-30 et 0-14-16 respectivement à la SCAM, chez Wal.Agri et au CRA-W. Pour les matières fertilisantes reprises sous le libellé « NP composé (autre) », la SCAM et Wal.Agri proposent un « petit DAP » dont la composition centésimale est de 12-27-0. Pour le PK poudre, nous avons choisi la formule la plus courante qui correspond au 0-6-12.

Ces adaptations en fonction des particularités du terrain ont fait que le nombre total d'échantillons d'engrais minéraux prélevés s'élève finalement à 67.

Tableau 46. Matières fertilisantes minérales prélevées au cours de la campagne d'échantillonnage des engrais minéraux. Les organismes dans lesquels ont été prélevées les matières et leur composition centésimale sont précisés.

Catégorie	Matière fertilisante	Organisme	Nombre d'éch. prél.	N	P2O5	K2O	CaO	MgO	SO3	Na2O
N	Nitrate d'ammonium	Wal.Agri	2	27	0	0	0	0	0	0
	Nitrate d'ammonium	Wal.Agri	2	27	0	0	0	4	0	0
	Nitrate d'ammonium	SCAM	2	27	0	0	0	0	0	0
	Solution azotée	Wal.Agri	4	30	0	0	0	0	0	0
	Sulfate d'ammoniaque	Wal.Agri	2	21	0	0	0	0	0	0
	Cyanamide calcique	Wal.Agri	2	19,8	0	0	0	0	0	0
	Urée granulée	Wal.Agri	1	46	0	0	0	0	0	0
	Urée perlée	SCAM	1	46	0	0	0	0	0	0
P2O5	Phosphates naturels tendres	Rosier	1	0	30	0	0	0	0	0
	Phosphates naturels granulés	Wal.Agri	3	0	26	0	0	0	0	0
	Triple superphosphates	SCAM	2	0	46	0	0	0	0	0
	Superphosphates	CRA-W	2	0	20	0	0	0	0	0
K2O	Chlorure de potassium 40	Wal.Agri	2	0	0	40	0	6	0	4
	Chlorure de potassium 60	Wal.Agri	2	0	0	60	0	0	0	0
	Chlorure de potassium 40	SCAM	2	0	0	40	0	6	0	4
	Chlorure de potassium 60	SCAM	2	0	0	60	0	0	0	0
	Kaïnite	Wal.Agri	2	0	0	11,5	0	5	10	27
	Kaïnite	SCAM	2	0	0	11,5	0	5	10	27
	Sulfate de potassium	Wal.Agri	1	0	0	30	0	10	0	0
	Sulfate de potassium	SCAM	1	0	0	30	0	10	0	0
	Haspargit	Promagro	2	0	4	16	0	0	0	0
Engrais composés	NPK composé	Wal.Agri	2	18	6	5	0	0	0	0
	NPK composé	SCAM	2	5	10	30	0	0	0	0
	PK poudre	Wal.Agri	2	0	6	12	0	0	0	0
	DAP	Wal.Agri	2	0	18	46	0	0	0	0
	DAP	SCAM	2	0	18	46	0	0	0	0
	PK composé	Wal.Agri	2	0	11	11	0	0	0	0
	PK composé	SCAM	2	0	7	30	0	0	0	0
	PK composé	CRA-W	1	0	14	16	0	0	0	0
	NP composé (autre)	Wal.Agri	1	12	27	0	0	2	23	0
	NP composé (autre)	SCAM	1	12	27	0	0	2	23	0
Engrais calcaires	Dolomie	Wal.Agri	2	0	0	0	31	19	0	0
	Dolomie	SCAM	2	0	0	0	31	19	0	0
	Carbonates de calcium	Wal.Agri	2	0	0	0	39	0	0	0
	Autres (algues, …)	Wal.Agri	2	0	0	0	0	11	0	0
	MgO (Kiésérite)	Wal.Agri	1	0	0	0	0	25	0	0
	MgO (Kiésérite)	SCAM	1	0	0	0	0	25	0	0
Total			67							

3.1.2. Méthode de prélèvement

La grande majorité des engrais minéraux qui ont été prélevés chez Wal.Agri et à la SCAM se trouvaient en tas de plusieurs dizaines voire centaines de tonnes. Pour l'échantillonnage de ces matières, nous avons utilisé une sonde tubulaire en PVC dont les dimensions étaient de 3,5 cm de diamètre et de 2 m de longueur. Par prélèvement, la sonde était enfoncée à quatre reprises de manière oblique vers le haut à différents endroits dans le tas d'engrais. Les quatre prises étaient successivement versées dans des sacs en plastique utilisés pour les prélèvements d'échantillons de sol et fermés à l'aide d'un colson. Après le prélèvement de chaque matière, la sonde était « nettoyée » en sondant « à blanc » trois fois dans le nouveau tas d'engrais minéraux à échantillonner.

Nous avons dû adapter notre méthode de prélèvement pour certains engrais minéraux qui n'étaient pas stockés en tas. La solution azotée, a été prélevée à l'aide d'un récipient en plastique par une ouverture se trouvant en haut de la cuve de stockage et transvasée dans des conteneurs en plastique d'environ 10 litres. L'urée granulée, le superphosphate et l'engrais PK 0-14-16 ont été prélevés à l'aide d'une pelle en plastique car les matières étaient conditionnées dans des sacs. La cyanamide calcique était conditionnée en big bag et nous l'avons prélevée à l'aide d'une pelle en plastique. Les échantillons d'urée perlée et de phosphate naturel tendre nous ont été donnés par la SCAM déjà conditionnés dans des sacs en plastique.

Les quantités d'échantillons d'engrais minéraux variaient de 1-2 kg (échantillons fournis) à 3-5 kg (échantillons prélevés).

3.1.3. Conditionnement

A partir de tous les échantillons d'engrais minéraux récoltés, nous avons pris un sous-échantillon de 50 ml (de 40 à 60 g) pour l'envoi aux laboratoires d'analyse (SARM et CARAH). Chaque échantillon a été préalablement mélangé pour la prise du sous-échantillon à l'aide d'une cuillère en plastique à usage unique. Les sous-échantillons ont été conditionnés dans des conteneurs en polypropylène de 50 ml pour l'envoi aux laboratoires.

3.1.4. Laboratoires d'analyse

Les laboratoires d'analyses ont été choisis en fonction de recherches effectuées par l'asbl Réquasud (T. Cugnon ; voir rapport en annexe 1). Le SARM et le CARAH ont été identifiés comme les deux laboratoires les plus appropriés pour la réalisation des analyses souhaitées.

Le SARM (Service d'Analyse des Roches et des Minéraux – CNRS) est le seul laboratoire d'analyse proposant le dosage des éléments des terres rares. En fait, le SARM propose un package d'analyse de 43 éléments traces (ET) parmi lesquels se trouve une grande partie des ETM identifiés comme potentiellement présents dans les engrais minéraux phosphatés.

Le CARAH (Centre pour l'agronomie et l'agro-industrie de la province de Hainaut) propose l'analyse de 10 ETM (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se et Zn). Nous avons choisi de réaliser les analyses au SARM et au CARAH. Le CARAH étant un laboratoire accrédité du réseau Réquasud, l'analyse en double de 10 ETM par le SARM nous permet d'avoir une idée de la justesse des dosages réalisés. Etant donné que le SARM fonctionne par package pour le dosage des ETM, nous avons choisi de réaliser les analyses des 43 ETM sur toutes les matières minérales échantillonnées. Cela nous permet d'avoir une vue d'ensemble et comparable de la contamination en ET des différents engrais minéraux.

3.2. Engrais de ferme

3.2.1. Matières échantillonnées

L'échantillonnage des engrais de ferme a été réalisé par l'asbl Agra-Ost.

Les nombres d'échantillons d'engrais de ferme, qui ont été prélevés par catégorie fixée, sont présentés au Tableau 47. Pour la catégorie d'engrais de ferme « lisier de bovin viandeux » en zone polyculture/élevage, aucune exploitation n'a pu être trouvée.

Auparavant, les lisiers produits en exploitation viandeuse polyculture/élevage étaient des exploitations mixtes où il y avait production de fumier et de lisier. Avec l'évolution des pratiques, il a certainement été plus efficace de ne plus récolter le lisier en tant que tel mais de le mélanger avec de la paille pour faire du fumier mou. En effet, la présence abondante de paille dans la zone polyculture/élevage favorise la production de fumier. De plus, le lisier produit dans ces exploitations a une forte teneur en matière sèche, ce qui rend son pompage difficile. Les quantités de lisier produites et calculées pour ce type d'exploitation se retrouvent donc dans le fumier ou le fumier mou de bovin viandeux de la zone polyculture/élevage.

Notons que pour cette catégorie d'engrais de ferme, la majeure partie de la production de lisier calculée provient des restitutions au pâturage qui a été considérée comme faite sous forme de lisier (chapitre 2).

Les cinq échantillons alloués à la catégorie lisier de bovin viandeux en zone polyculture/élevage ont été redistribués dans les catégories 2, 6, 7, 10 et 11.

Les 60 échantillons d'engrais de ferme ont été prélevés avec le souci de couvrir spatialement l'ensemble de la Wallonie. La Figure 30 montre la répartition de l'échantillonnage des engrais de ferme.

Tableau 47. Nombre d'échantillons prélevé par catégorie d'engrais de ferme fixée.

Numéro de catégories d'engrais de ferme	Types d'engrais de ferme	Catégorie animale	Spéculation	Zone	Nombre d'échantillons prélevés
1	**Lisier**	Bovin	Lait	Herbager	8
2	**Lisier**	Bovin	Lait	Polyculture/élevage	6
3	**Lisier**	Bovin	Viande	Herbager	7
4	**Lisier**	Bovin	Viande	Polyculture/élevage	0
5	**Lisier**	Porc	Engraissement	Wallonie	2
6	**Fumier**	Bovin	Lait	Herbager	6
7	**Fumier**	Bovin	Lait	Polyculture/élevage	6
8	**Fumier**	Bovin	Viande	Herbager	9
9	**Fumier**	Bovin	Viande	Polyculture/élevage	8
10	**Compost**	Bovin	Viande	Herbager	2
11	**Compost**	Bovin	Viande	Polyculture/élevage	2
12	**Fiente**	Volaille	Chair	Wallonie	2
13	**Fiente**	Volaille	Production œufs	Wallonie	2
Total					60

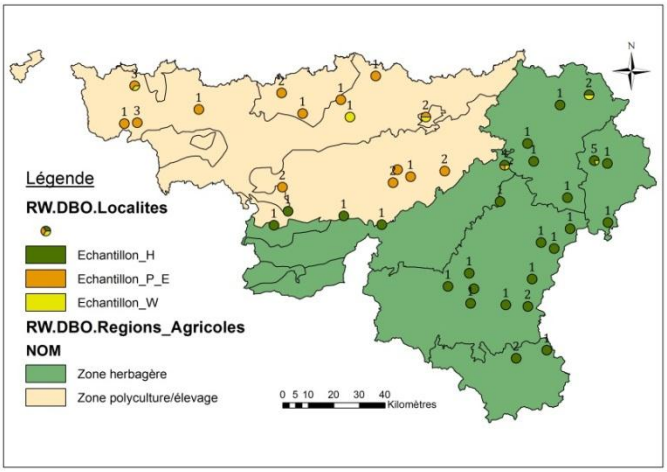

Figure 30. Répartition des échantillons d'engrais de ferme prélevés en Wallonie. Les points verts représentent les échantillons prélevés en zone/exploitation herbagère (échantillon_H), les points oranges, les échantillons prélevés en zone/exploitation polyculture/élevage (échantillon_P_E) et les points jaunes sont les échantillons prélevés en Wallonie, indistinctement des zones herbagère et polyculture/élevage (échantillon_W). Le nombre d'échantillons prélevés dans une même localité est indiqué au-dessus des points verts, oranges et jaunes.

3.2.2. Méthode de prélèvement

L'échantillonnage des engrais de ferme a été réalisé de manière différente en fonction des matières.

a. Lisiers

Pour l'échantillonnage des lisiers, les prélèvements ont été réalisés à l'aide d'un tube en PVC bouché par une balle de tennis à une des deux extrémités (Figure 31). Le tube est plongé lentement et verticalement avec les deux extrémités ouvertes jusqu'au fond de la cuve ou de la fosse. Le tube est alors complètement rempli de lisier échantillonné sur toute la hauteur de la cuve. L'extrémité du bas du tube est refermée en tirant sur la ficelle liée à la balle de tennis. Le tube est sorti de la cuve et est vidé dans le seau à lisier. L'opération est réalisée à quatre voire cinq reprises. Après chaque prélèvement, le matériel est nettoyé à l'eau courante.

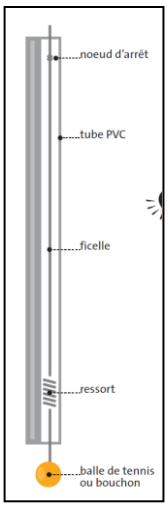

Figure 31. Représentation du tube de prélèvement des lisiers (Lambert, 2012).

b. Fumiers, fumiers compostés et fientes de poules

Pour l'échantillonnage des fumiers, des fumiers compostés et des fientes de poules, les prélèvements ont été effectués avec une fourche et/ou une sonde en métal à bord denté en fonction de la compacité des fumiers. Par échantillon, de 10 à 40 prises sont réalisées à différents endroits du tas ou de la zone d'échantillonnage. Ces différentes prises sont ensuite mélangées ensemble dans un récipient en plastique. A partir de ce mélange de 25 à 30 kg, un sous-échantillon d'environ 5 kg est prélevé et placé dans un sac en plastique épais prévu pour l'échantillonnage des engrais de ferme.

3.2.3. Laboratoires d'analyse

Comme pour les engrais minéraux, les laboratoires d'analyse ont été choisis en fonction de recherches effectuées par l'asbl Réquasud (T. Cugnon). Le Centre de Michamps et de Tinlot-Scry ont été choisis. Ces deux laboratoires sont en effet les plus appropriés pour la réalisation des analyses des ETM identifiés dans les engrais de ferme prélevés.

Le Centre de Michamps s'est chargé du dosage de l'As, du Cd, du Co, du Cr, du Cu, du Hg, du Mo, du Ni, du Pb et du Zn. Le laboratoire de Tinlot-Scry a réalisé les analyses pour le Ba, Be, Li, Se, Sr et V.

L'ISSeP est le seul laboratoire qui a pu être identifié par l'asbl Réquasud pour le dosage des CTO dans les engrais de ferme. Ce laboratoire propose le dosage des hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP) et des polychlorobiphényles (PCB). Les autres CTO qui ont été identifiés par la revue bibliographique (phénols, phtalates, phosphates triesters, cis- et trans- isosafrol, LAS et antibiotiques) n'ont pas pu être dosés car, soit les laboratoires n'ont pas de méthode de dosage normalisée pour ces composés, soit ils ne réalisent pas les dosages sur ces genres de matrices (Galloy, 2012).

4. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

Les résultats des analyses en ETM réalisées sur les engrais minéraux et les engrais de ferme sont successivement présentés dans cette partie. Les tableaux de synthèse pour les matières exogènes proviennent de données fournies par la Direction de la Protection des Sols (DPS - SPW).

Pour chaque matière analysée, nous avons renseigné dans les tableaux la teneur moyenne et l'écart-type de chaque ETM analysé.

Tous les résultats d'analyses réalisés pour les engrais minéraux et les engrais de ferme se trouvent en annexes 11 à 13.

Des histogrammes classant les engrais minéraux et les engrais de ferme (et les matières exogènes pour les analyses disponibles) en fonction des teneurs moyennes en ETM se trouvent aux annexes 6 à 8.

Les annexes 9 et 10 classent uniquement les engrais minéraux en fonction de leurs teneurs en ETM.

4.1. Engrais minéraux

4.1.1. Remarque préalable

L'analyse des engrais minéraux a été réalisée dans deux laboratoires (le SARM et le CARAH). Parmi les ETM analysés, huit étaient dosés en commun par les deux laboratoires. Ce sont l'As, le Cd, le Cr, le Cu, le Mo, le Ni, le Pb et le Zn.

L'analyse des résultats de chacun des huit ETM dans les deux laboratoires montre un sous dosage systématique du CARAH (Figure 32).

Cette différence provient du fait que les deux laboratoires utilisent une méthode d'extraction différente. Le SARM extrait les ETM par fusion alcaline tandis que le CARAH les extrait à l'eau régale.

La méthode d'extraction à l'eau régale est une méthode considérée comme « pseudo-totale » (Baize *et al.*, 2007). Cela signifie qu'elle ne dose pas la totalité des ETM présents dans la matière. La méthode d'extraction par fusion alcaline est quant à elle une méthode d'extraction considérée comme totale.

Cela explique pourquoi les analyses réalisées par le CARAH sont systématiquement plus faibles que celles du SARM.

Les résultats des analyses des deux laboratoires sont pris en considération car ils répondent à deux approches différentes.

Les résultats du SARM permettent de comparer les engrais minéraux entre eux sur une large gamme d'ETM. De plus, cela permet de comparer les engrais minéraux et les engrais de ferme pour des ETM moins couramment étudiés (et non analysés par les laboratoires wallons) comme le Ba, le Sr et V.

Les résultats du CARAH permettent quant à eux une comparaison cohérente avec les résultats d'analyses des autres types de matières fertilisantes. Les analyses des ETM « classiques » réalisées pour les engrais de ferme et les matières exogènes ont en effet été réalisées par des laboratoires wallons qui utilisent la même méthode d'analyse que celle du CARAH.

Des points 4.1.3 à 4.1.7, les résultats d'analyse du SARM et du CARAH seront présentés. Les résultats du SARM et du CARAH sont commentés sur base des ETM qui ont les teneurs les plus élevées dans les matières minérales abordées. Les ordres d'importance des ETM dans les matières minérales étant similaires pour les des deux laboratoires, les résultats du CARAH seront commentés uniquement sur les deux ETM n'étant pas dosés par le SARM, à savoir le Hg et le Se.

4.1.2. Présentation des résultats

Les résultats d'analyses sont présentés de manière groupée en fonction de l'élément nutritif pour lequel il est apporté. Nous passerons donc successivement en revue les engrais azotés, phosphatés, potassiques, composés - qui apportent au moins deux éléments nutritifs à la fois - et les engrais calcaro-magnésiens.

Il faut noter que, pour les engrais minéraux, les résultats sont présentés en mg/kg de matière brute. La teneur en humidité dans les engrais minéraux variant de 2 à 5 % (Parmentier, 2012).

Pour la présentation des résultats où tous les échantillons analysés se trouvent sous la limite de détermination (L.D.) de l'élément considéré, nous avons choisi de ne pas calculer de moyenne et donc de considérer que la valeur est inférieure à la L.D. Nous avons signalé ces cas de figure par la notation « < L.D ». Ces L.D. varient selon l'ETM analysé. Ces valeurs limites sont reprises pour chaque élément analysé dans les lignes intitulées « L.D. (ppm) » des tableaux se trouvant aux annexes 2 à 5.

Les écarts-types ont été calculés pour les matières où au moins trois valeurs avaient pu être déterminées. Dans les cas contraires, nous l'avons signalé par la notation « N.D. » (non déterminé).

L'incertitude sur la mesure – exprimée en % de la valeur mesurée – a été déterminée en comparant les moyennes calculées aux valeurs se trouvant dans les tableaux de l'annexe 2 – lignes correspondant à « incertitude sur la mesure ». Lorsqu'aucune valeur moyenne n'a pu être calculée (< L.D.), l'incertitude sur le dosage n'a pu être déterminée. Comme pour l'écart-type, nous l'avons signalé par la notation N.D. Lorsque cette incertitude sur la mesure est très proche de la L.D.,

l'incertitude peut être supérieure à 25 %. Cependant, l'incertitude ne dépasse que très rarement les 50 % (Marin, 2012).

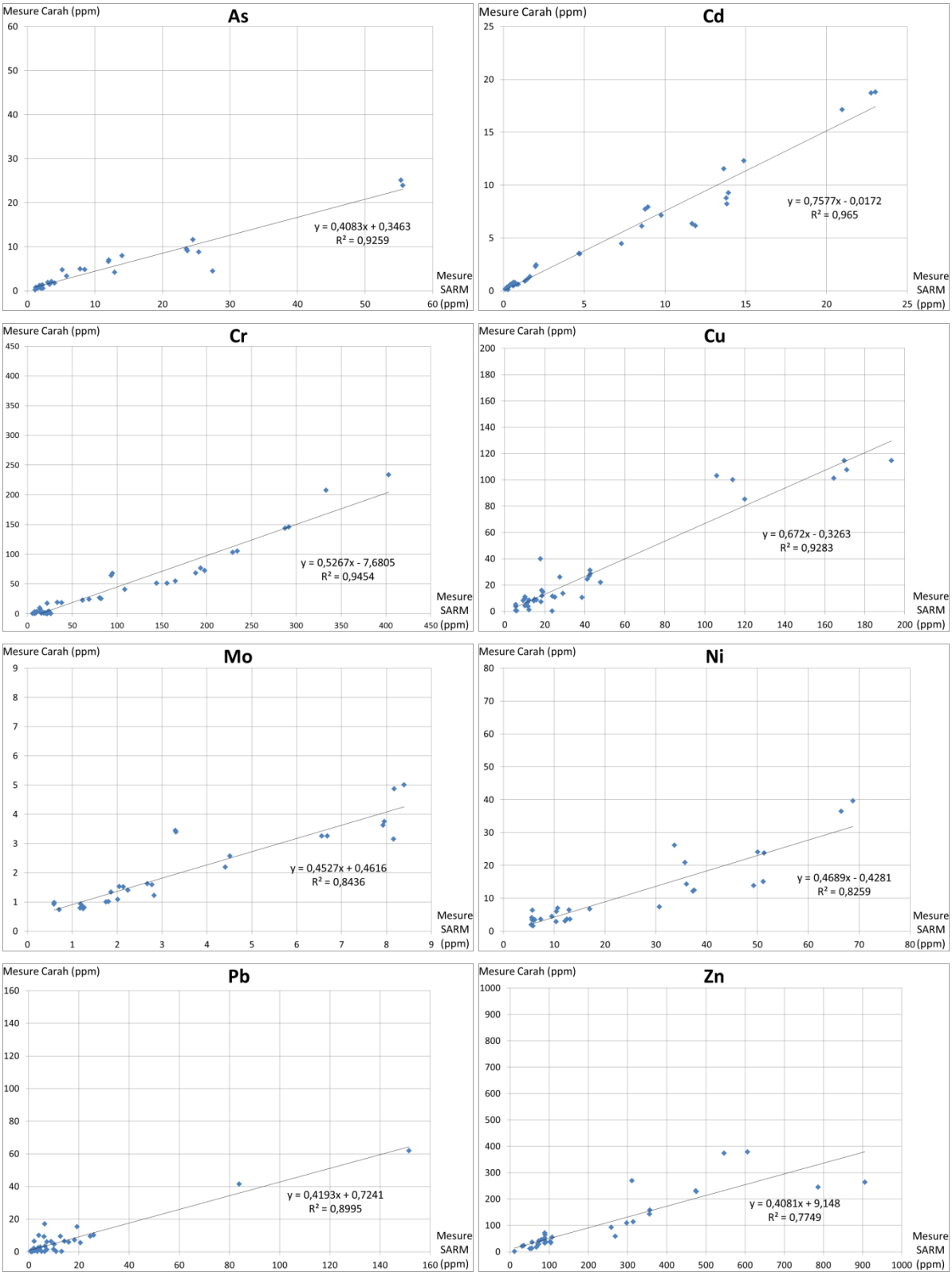

Figure 32. Comparaison des résultats d'analyse du SARM et du CARAH.

4.1.3. Engrais azotés

a. Nitrate d'ammonium

Résultats du SARM

Le nitrate d'ammonium ne contient pas de grandes quantités d'ETM comparativement aux autres engrais minéraux. Certains ETM se retrouvent cependant en quantités non négligeables.

Le Ba se trouve à une teneur moyenne de 26,89 mg/kg M.B. (Tableau 48). Cette teneur en Ba est supérieure à celles retrouvées dans les engrais calcaro-magnésiens, potassiques et azotés, mais bien plus faible que les teneurs d'autres engrais minéraux comme les engrais phosphatés qui peuvent contenir jusqu'à plus de 3000 mg Ba/kg M.B. (cas du superphosphate et de l'engrais complexe 12-27-0).

Le Cu est dosé à 23,72 mg/kg M.B. Notons que cette valeur moyenne provient d'un seul échantillon qui se trouvait au-dessus de la L.D. (5 mg/kg M.B.) mesurée avec une incertitude < 10 %. Cette teneur est généralement supérieure aux engrais calcaro-magnésiens, potassiques et azotés mais est inférieure à celles des engrais phosphatés qui peuvent doser jusqu'à un peu plus de 170 mg Cu/kg M.B. (cas du superphosphate et de l'engrais complexe 0-6-12).

Le nitrate d'ammonium contient aussi des quantités significatives de Sr. Il dose en moyenne 458,8 mg Sr/kg M.B. Encore une fois, cette teneur est généralement supérieure aux engrais calcaro-magnésiens potassiques et azotés mais inférieure à celles des engrais phosphatés qui peuvent aller jusqu'à un peu plus de 2350 mg Cu/kg M.B. (cas du superphosphate).

Tableau 48. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le nitrate d'ammonium (données du SARM).

Nitrate d'ammonium (n = 4)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
		As	**Ba**	**Be**	**Bi**	**Cd**	**Ce**	**Co**	**Cr**	**Cs**	**Cu**	**Dy**
	Moyenne	< L.D.	26.89	< L.D.	< L.D.	0.145	3.191	0.300	7.521	< L.D.	23.72	0.092
	Ecart-type	N.D.	10.48	N.D.	N.D.	0.028	0.975	N.D.	1.061	N.D.	N.D.	0.014
	Incertitude sur la mesure	N.D.	< 10 %	N.D.	N.D.	> 25 %	< 10 %	> 25 %	> 25 %	N.D.	< 10 %	< 15 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	0.049	0.042	< L.D.	0.139	< L.D.	0.119	0.018	< L.D.	2.823	0.007	< L.D.
	Ecart-type	0.004	0.005	N.D.	0.011	N.D.	0.087	0.002	N.D.	0.951	0.001	N.D.
	Incertitude sur la mesure	> 25 %	< 10 %	N.D.	< 5 %	N.D.	< 15 %	> 25 %	N.D.	< 5 %	< 10 %	N.D.
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	0.175	1.422	< L.D.	1.032	0.395	0.638	< L.D.	0.189	< L.D.	458.8	0.017
	Ecart-type	0.046	0.131	N.D.	0.325	0.067	0.081	N.D.	0.007	N.D.	231.5	0.005
	Incertitude sur la mesure	< 15 %	< 5 %	N.D.	< 10 %	< 10 %	> 25 %	N.D.	< 10 %	N.D.	< 5 %	> 25 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	0.017	0.054	0.007	0.305	1.139	< L.D.	0.852	0.043	< L.D.	4.84	
	Ecart-type	0.002	0.015	0.001	0.015	0.107	N.D.	0.064	0.004	N.D.	3.79	
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	> 25 %	> 25 %	< 15 %	> 25 %	N.D.	> 25 %	> 25 %	N.D.	> 25 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour le nitrate d'ammonium se trouvent dans le Tableau 49.

Tableau 49. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le nitrate d'ammonium (données du CARAH).

Nitrate d'ammonium (n = 4)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	0,099	0,184	0,524	0,179	0,014	0,126	0,274	0,299	0,483	0,902
	Ecart-type	0,061	0,023	0,024	0,007	0,004	0,005	0,112	0,059	0,331	0,078

Nitrate d'ammonium (+ 4 % MgO)

Résultats du SARM

Par rapport au nitrate d'ammonium, le nitrate d'ammonium (+ 4 % de MgO) est généralement moins riche en ETM (Tableau 50). Il contient cependant des quantités légèrement supérieures en Cr et V. Pour le Ga, le Nb, le Rb, le Th et le Pb, en particulier, les teneurs sont *grosso modo* deux fois plus élevées que pour le nitrate d'ammonium.

Tableau 50. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le nitrate d'ammonium (+ 4 % MgO) (données du SARM).

Nitrate d'ammonium (4% MgO) (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
	Moyenne	< L.D.	5.896	< L.D.	< L.D.	< L.D.	1.496	0.310	8.469	< L.D.	12.19	0.072
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	N.D.	> 25 %	N.D.	N.D.	N.D.	< 10 %	> 25 %	> 25 %	N.D.	< 10 %	< 15 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	0.043	0.026	0.301	0.085	< L.D.	0.068	0.014	< L.D.	0.947	0.006	< L.D.
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	> 25 %	< 10 %	> 25 %	< 10 %	N.D.	> 25 %	> 25 %	N.D.	< 10 %	< 10 %	N.D.
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	0.261	0.637	< L.D.	3.356	0.175	1.714	< L.D.	0.113	< L.D.	31.22	0.019
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 15 %	< 10 %	N.D.	< 10 %	< 10 %	< 10 %	N.D.	< 10 %	N.D.	< 10 %	> 25 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	0.014	0.128	0.007	0.164	1.766	< L.D.	0.450	0.040	< L.D.	2.890	
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 15 %	> 25 %	< 15 %	> 25 %	N.D.	> 25 %	> 25 %	N.D.	> 25 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour le nitrate d'ammonium (+ 4 % MgO) se trouvent dans le Tableau 51.

Tableau 51. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le nitrate d'ammonium (+ 4 % MgO) (données du CARAH).

Nitrate d'ammonium (4% MgO) (n = 4)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	0,365	0,112	4,015	0,908	0,023	0,349	1,413	2,503	0,230	7,44
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

b. Solution azotée

Résultats du SARM

En ce qui concerne la solution azotée, tous les ETM analysés se trouvent sous la L.D. Cela peut être expliqué par le processus de fabrication de la solution azotée. L'azote des engrais minéraux azotés est issu du N atmosphérique (procédé Haber-Bosch) et dans le cas particulier de la solution azotée, aucune matière de charge originaire d'un dépôt géologique potentiellement chargé en ETM n'est ajoutée.

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour la solution azotée se trouvent dans le Tableau 52.

Tableau 52. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans la solution azotée (données du CARAH).

Solution azotée (n = 4)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	< L.D.	< L.D.	0,062	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0,130	0,111	< L.D.	< L.D.
	Ecart-type	N.D.	N.D.	0,010	N.D.	N.D.	N.D.	0,004	0,014	N.D.	N.D.

c. Sulfate d'ammonium

Résultats du SARM

Le sulfate d'ammonium est très peu chargé en ETM (Tableau 53). Parmi les 43 ETM analysés, seulement trois ETM se trouvent au-dessus de la L.D. Ce sont le Pb, le Rb et l'U avec respectivement, 7,547, 1,496 et 0,047 mg/kg M.B. en moyenne. L'incertitude sur la mesure de l'U se trouvant dans un ordre de grandeur > à 25 % (mais pas plus élevé que 50 %).

Pour le Rb, le sulfate d'ammonium se trouve parmi les cinq engrais les moins chargés et parmi les trois engrais les moins riches pour l'U.

L'ETM se trouvant en des quantités plus significatives par rapport aux autres engrais minéraux est le Pb.

Tableau 53. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le sulfate d'ammonium (données du SARM).

Sulfate d'ammonium (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
	Moyenne	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	< L.D.	< L.D.	< L.D.	7.547	< L.D.	1.496	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	N.D.	N.D.	N.D.	< 10 %	N.D.	< 10 %	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0.047	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	Incertitude sur la mesure	N.D.	N.D.	N.D.	> 25 %	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour le sulfate d'ammonium sont présentés dans le Tableau 54.

Tableau 54. . Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le sulfate d'ammonium (données du CARAH).

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
Sulfate d'ammonium (n = 2)	Moyenne	0,019	< L.D.	0,157	0,023	0,025	0,032	0,074	< L.D.	0,410	0,386
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

d. Cyanamide calcique

Résultats du SARM

La cyanamide calcique est généralement plus chargée en ETM que les autres engrais azotés. Elle est aussi très souvent plus chargée que les engrais potassiques et calcaro-magnésiens mais quasiment toujours moins riche en ETM que les engrais phosphatés. Les ETM qui se trouvent à des teneurs élevées par rapport aux autres engrais minéraux sont le Co, Ni, V et W (Tableau 55).

Le Co se trouve à une teneur moyenne de 1,707 mg/kg M.B. de cyanamide calcique. Cette teneur est supérieure à celles de tous les autres engrais minéraux analysés sauf pour les engrais complexes 12-27-0 et 0-6-12 qui ont des teneurs moyennes à peine inférieures (un peu moins de 4,7 mg Co/kg M.B. pour le 12-27-0).

Le Ni, le V et le W sont dosés respectivement à 50,18 mg/kg M.B., 201,3 mg/kg M.B. et 0,390 mg/kg M.B. de cyanamide calcique. Avec l'engrais complexe 12-27-0 et le superphosphate, ce sont les trois engrais minéraux les plus riches en Ni, V et W.

Notons que, pour le Cd, Cu, Rb, Sr et Yb, la cyanamide calcique est moins riche que le nitrate d'ammonium.

Tableau 55. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans la cyanamide calcique (données du SARM).

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
Cyanamide calcique (n = 2)	Moyenne	2.254	57.29	< L.D.	0.149	< L.D.	4.751	2.707	14.52	< L.D.	10.16	0.684
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	> 25 %	< 5 %	N.D.	> 25 %	N.D.	< 10 %	< 15 %	< 10 %	N.D.	< 10 %	< 10 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	0.408	0.167	< L.D.	0.741	0.174	0.151	0.144	< L.D.	4.223	0.057	1.939
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	> 25 %	< 15 %	< 10 %	N.D.	< 5 %	< 10 %	< 10 %
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	0.534	3.276	50.18	1.275	0.796	< L.D.	1.163	0.685	< L.D.	99.73	0.051
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 15 %	< 5 %	< 5 %	< 10 %	< 10 %	N.D.	< 10 %	< 10 %	N.D.	< 5 %	> 25 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	0.109	0.686	0.059	0.886	201.3	0.390	6.809	0.352	< L.D.	6.359	
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 15 %	> 25 %	< 15 %	< 5 %	> 25 %	> 25 %	< 10 %	N.D.	> 25 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour la cyanamide calcique sont présentés dans le Tableau 56.

Tableau 56. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans la cyanamide calcique (données du CARAH).

Cyanamide calcique (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	0,926	< L.D.	6,767	10,44	0,023	1,211	14,48	0,289	< L.D.	0,180
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

e. Urée

Résultats du SARM

L'analyse de l'urée n'a donné aucun résultat supérieur à la L.D. Le procédé de fabrication de l'urée ne prévoit en effet aucun ajout de matière de charge. L'urée synthétisée par voie chimique est simplement granulée par vaporisation d'urée liquide à haute température sur de fins granules d'urée permettant la prise en masse.

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour l'urée sont présentés dans le Tableau 57.

Tableau 57. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans l'urée (données du CARAH).

Urée (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	0,090	0,042	0,394	0,083	0,015	0,133	0,332	0,146	< L.D.	1,458
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

4.1.4. Engrais phosphatés

a. Phosphate naturel semi-attaqué

Résultats du SARM

Le phosphate naturel semi-attaqué a des teneurs élevées en ETM par rapport aux autres engrais minéraux. Il se trouve généralement parmi les trois, quatre ou cinq engrais minéraux les plus chargés en ETM.

L'As, le Cu, l'Er, le Ho, le Lu, le Mo, le Tm, l'Y, l'Yb se trouvent à des teneurs particulièrement élevées dans le phosphate naturel semi-attaqué (Tableau 58).

La revue bibliographique (chapitre 1.) mentionnait des teneurs de 4,5 mg As/kg MS. et 16 mg Cu/kg MS. dans les phosphates naturels tendres. Ces valeurs sont donc bien inférieures à celles de nos résultats d'analyse (24,21 mg As/kg M.B et. 113,3 mg Cu/kg M.B.).

da Silva *et al.* (2010) renseignent des teneurs légèrement supérieures mais se trouvant dans le même ordre de grandeur pour l'Er, Ho, Lu, Mo, Tm et Yb dans les phosphorites de la mine de Kalaat Khasba en Tunisie.

Certains ETM, cependant, ne se trouvent pas à des teneurs particulièrement élevées comme le Ce, Co, Cs, Nb, Pb, Pr, Rb, Ta et Th. Pour le Bi, Sn et W, les teneurs se trouvent sous la L.D.

Tableau 58. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le phosphate naturel semi-attaqué (données du SARM).

Phosphate naturel semi-attaqué (n = 3)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
	Moyenne	24.21	448.6	1.693	< L.D.	13.85	62.90	1.226	193.0	0.278	113.3	15.55
	Ecart-type	0.84	22.3	0.041	N.D.	0.05	0.69	0.059	4.1	0.002	5.7	0.12
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 5 %	> 25 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 15 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	< 5 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	10.50	3.526	1.963	15.89	0.275	0.569	3.494	< L.D.	82.48	1.729	8.012
	Ecart-type	0.13	0.039	0.052	0.18	0.021	0.044	0.037	N.D.	0.89	0.027	0.106
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 5 %	< 8 %	< 5 %	> 25 %	< 15 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	3.933	58.60	36.18	3.715	14.03	5.492	2.090	12.63	< L.D.	779.5	0.252
	Ecart-type	0.113	0.56	1.76	0.034	0.13	0.092	0.101	0.13	N.D.	11.4	0.008
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 5 %	> 25 %	< 10 %	< 5 %	< 10 %	< 10 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	< 15 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	2.371	6.538	1.522	152.2	165.3	< L.D.	180.9	10.10	307.9	39.19	
	Ecart-type	0.019	0.087	0.020	2.2	3.6	N.D.	2.2	0.11	7.3	1.55	
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 10 %	< 5 %	< 5 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %	< 15 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour le phosphate naturel semi-attaqué sont présentés dans le Tableau 59.

Tableau 59. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le phosphate naturel semi-attaqué (données du CARAH).

Phosphate naturel semi-attaqué (n = 3)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	9,157	8,746	72,42	96,1	0,027	3,511	16,91	1,707	0,657	163,9
	Ecart-type	0,288	0,422	3,41	7,8	0,011	0,257	6,54	0,539	0,076	74,7

b. Phosphate naturel en poudre

Résultats du SARM

Le phosphate naturel en poudre est relativement riche en ETM. Parmi ceux-ci, ce sont le Cd, Dy, Er, Ho, Lu, Tm, Y et Yb qui se trouvent à des teneurs particulièrement élevées par rapport aux autres engrais minéraux (Tableau 60).

La revue bibliographique mentionnait une teneur de l'ordre de 15 mg Cd/kg M.S. dans le phosphate naturel tendre, ce qui est un peu moins que la teneur de 20,97 mg Cd/kg M.B. trouvée par l'analyse. Les teneurs en Dy, Er, Ho, Lu, Tm, Y et Yb sont dans le même ordre de grandeur que les valeurs renseignées par l'étude de da Silva *et al.* (2010).

Les ETM se trouvant en moins grande concentration que pour les autres engrais minéraux sont le Mo, Pb et Rb. Le Sn et W se trouvent sous la L.D.

Tableau 60. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le phosphate naturel en poudre (données du SARM).

Phosphate naturel (poudre) (n = 1)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
	Moyenne	12.91	86.16	1.764	0.113	20.97	50.78	0.828	165.3	0.149	27.50	19.89
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 5 %	> 25 %	> 25 %	< 5 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	> 25 %	< 10 %	< 5 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	14.21	4.232	1.504	19.96	0.259	0.631	4.626	< L.D.	104.2	2.388	2.825
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 5 %	< 8 %	< 5 %	> 25 %	< 15 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	0.495	74.91	30.71	4.251	17.25	1.981	2.216	15.70	< L.D.	1037	0.053
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 15 %	< 5 %	> 25 %	< 10 %	< 5 %	< 10 %	< 10 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	> 25 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	3.000	5.376	2.073	146.9	119.6	< L.D.	280.5	14.01	269	46.14	
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 10 %	< 5 %	< 5 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %	< 15 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour le phosphate naturel en poudre sont présentés dans le Tableau 61.

Tableau 61. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le phosphate naturel en poudre (données du CARAH).

Phosphate naturel (poudre) (n = 1)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	4,200	17,15	54,75	26,14	0,013	1,221	7,399	1,817	0,400	57,99
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

c. Triple superphosphate

Résultats du SARM

Le triple superphosphate contient des quantités relativement élevées en ETM. Il n'est jamais classé en première position pour un ETM en particulier mais se trouve généralement dans le groupe de tête. C'est particulièrement le cas pour le Cd, le Lu, le Tm, l'U et l'Yb (Tableau 62).

La revue bibliographique renseignait une teneur de 44 mg Cd/kg M.S. dans le triple superphosphate, ce qui est supérieur à la teneur déterminée par nos analyses. Les teneurs renseignées par l'étude de da Silva *et al.* sont toutes légèrement supérieures pour le Lu, Tm et l'Yb mais de l'ordre de deux fois inférieures pour l'U – de 53,8 à 113,4 mg U/kg de phosphorite contre 207,4 mg/kg M.B. dans notre cas.

Le Nb et Pb se trouvent à des teneurs inférieures à celles des autres engrais minéraux. Le B, Sn et W sont sous la L.D.

Tableau 62. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le triple superphosphate (données du SARM).

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
Triple superphosphate (n = 2)		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
	Moyenne	12.03	130.0	2.125	< L.D.	14.26	18.93	0.910	231.8	0.320	42.74	8.148
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 5 %	> 25 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	> 25 %	< 10 %	< 5 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	6.410	1.582	1.947	7.591	0.330	0.405	1.984	< L.D.	41.04	1.618	4.461
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 5 %	< 8 %	< 5 %	> 25 %	< 15 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	0.793	27.17	35.91	1.919	6.339	5.039	2.190	5.711	< L.D.	388.6	0.057
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 15 %	< 5 %	> 25 %	< 10 %	< 5 %	< 10 %	< 10 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	> 25 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	1.159	3.729	1.072	207.4	176.9	< L.D.	115.0	8.335	356.7	34.97	
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 10 %	< 5 %	< 5 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %	< 15 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour le triple superphosphate sont présentés dans le Tableau 63.

Tableau 63. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le triple superphosphate (données du CARAH).

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
Triple superphos-phate (n = 2)		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	6,809	11,92	104,3	29,85	0,029	2,381	17,61	3,600	0,290	150,4
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

d. Superphosphate

Résultats du SARM

Le superphosphate est l'engrais minéral qui est globalement le plus riche en ETM (Tableau 64). Par rapport aux autres engrais minéraux analysés, il est le premier au classement des teneurs pour l'As, Ce, Dy, Eu, Gd, Hf, La, Mo, Nd, Pr, Sm, Sr, Tb et Zr. Il contient des teneurs relativement importantes d'ETM telles que le Ba, le Be, le Cr, le Cu, l'Er, le Ga, le Ge, l'Ho, le Lu, le Nb, le Ni, le Ta, le Tm, l'U, le V, le W, l'Y et l'Yb.

Par rapport à la revue bibliographique (chapitre 1), les teneurs en As, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, Pb et Zn du superphosphate sont plus élevées. Par rapport aux teneurs relevées dans les phosphorites de Kalaat Khasba (da Silva *et al.*, 2010), le Ce, le Co, l'Eu, le La, le Pb, l'U et le Zn se trouvent en quantités plus élevées dans le superphosphate.

En ce qui concerne le Ba, une étude italienne de 1983 (Senesi *et al.*, 1983) relevait des teneurs en Ba de 113 à 500 mg/kg dans les superphosphates contre 3227 mg/kg M.B. pour nos analyses.

Tableau 64. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le superphosphate (données du SARM).

Superphosphate (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
	Moyenne	55.46	3227	2.931	< L.D.	11.78	425.8	2.386	289.7	0.690	170.4	21.25
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 5 %	> 25 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 15 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	< 5 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	10.39	8.451	4.637	27.34	0.789	1.155	4.042	< L.D.	335.0	1.340	8.283
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 5 %	< 8 %	< 5 %	> 25 %	< 10 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	19.20	158.6	50.68	13.87	49.77	13.16	2.941	27.63	0.462	2357	1.144
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 5 %	< 5 %	< 5 %	< 5 %	< 5 %	< 10 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	< 10 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	3.775	12.43	1.347	321.2	413.0	0.547	160.3	8.286	475.2	83.05	
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 5 %	< 5 %	< 5 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	< 5 %	< 10 %	< 8 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour le superphosphate se trouvent dans le Tableau 65. Nous pouvons y voir que le Hg se trouve à une concentration de 0,078 mg/kg M.B., ce qui représente une teneur relativement élevée par rapport aux autres engrais minéraux analysés.

Tableau 65. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le superphosphate (données du CARAH).

Superphosphate (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	24,50	6,251	144,7	111,1	0,078	4,943	23,93	5,823	0,420	229,6
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

4.1.5. Engrais potassiques

a. Chlorure de potassium 40 %

Résultats du SARM

Le chlorure de potassium 40 % est un engrais minéral qui ne contient pas de grandes quantités d'ETM par rapport aux autres engrais (Tableau 66).

De manière générale, les ETM analysés se trouvent dans des gammes de valeurs relativement faibles. L'As, Be, Bi, Cd, Cs, Cu, Ge, Mo, Ni, Sb, Sn, W et Zn se trouvent d'ailleurs sous la L.D.

Cependant, le chlorure de potassium 40 % contient des quantités non négligeables de Pb, Sr et surtout de Rb avec 29,70 mg Rb/kg M.B., ce qui est comparable à l'engrais complexe 0-11-11 qui dose un peu moins de 33 mg Rb/kg M.B.

Tableau 66. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le chlorure de potassium (40 %) (données du SARM).

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
Chlorure de potassium (40%) (n = 4)		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
	Moyenne	< L.D.	7.249	< L.D.	< L.D.	< L.D.	1.431	0.256	18.03	< L.D.	< L.D.	0.093
	Ecart-type	N.D.	0.348	N.D.	N.D.	N.D.	0.058	0.003	1.67	N.D.	N.D.	0.006
	Incertitude sur la mesure	N.D.	> 25 %	N.D.	N.D.	N.D.	< 10 %	> 25 %	< 10 %	N.D.	N.D.	< 15 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	0.049	0.028	0.523	0.107	< L.D.	0.069	0.018	< L.D.	0.747	0.008	< L.D.
	Ecart-type	0.004	0.002	0.071	0.003	N.D.	0.004	0.001	N.D.	0.029	0.001	N.D.
	Incertitude sur la mesure	> 25 %	< 10 %	> 25 %	< 5 %	N.D.	> 25 %	> 25 %	N.D.	< 10 %	< 10 %	N.D.
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	0.283	0.654	< L.D.	9.22	0.164	29.70	< L.D.	0.128	< L.D.	100.4	0.027
	Ecart-type	0.008	0.026	N.D.	3.85	0.004	1.09	N.D.	0.003	N.D.	3.6	0.001
	Incertitude sur la mesure	< 15 %	< 10 %	N.D.	< 10 %	< 10 %	< 5 %	N.D.	< 10 %	N.D.	< 5 %	> 25 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	0.016	0.253	0.007	0.125	6.629	< L.D.	0.535	0.050	< L.D.	2.658	
	Ecart-type	0.001	0.010	0.000	0.013	0.502	N.D.	0.024	0.004	N.D.	0.245	
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 15 %	> 25 %	< 15 %	> 25 %	N.D.	> 25 %	> 25 %	N.D.	> 25 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour le chlorure de potassium (40 %) sont présentés dans le Tableau 67.

Tableau 67. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le chlorure de potassium (40 %) (données du CARAH).

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
Chlorure de potassium (40%) (n = 4)		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	0,202	0,028	1,035	0,324	0,011	0,237	0,812	< L.D.	< L.D.	0,814
	Ecart-type	0,011	N.D.	0,287	0,071	N.D.	0,017	0,202	N.D.	N.D.	0,177

b. Chlorure de potassium 60 %

Résultats du SARM

Le chlorure de potassium 60 % s'inscrit dans la même tendance que le chlorure de potassium 40 % mais avec des teneurs en ETM encore plus faibles (Tableau 68).

Parmi les 43 ETM analysés, seulement 13 ETM se trouvent à des teneurs supérieures à la L.D. Ce sont le Ba, le Cr, le Cu, le Dy, l'Ho, le Nd, le Pb, le Pr, le Rb, le Sm, le Sr, le Tm et le V. Le Pb et en particulier le Rb se trouvent à des teneurs relativement supérieures par rapport aux 11 autres ETM.

Notons que, par rapport au chlorure de potassium 40 %, les teneurs moyennes en Cr, Cu et Pb sont légèrement plus élevées.

Tableau 68. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le chlorure de potassium (60 %) (données du SARM).

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
Chlorure de potassium (60%) (n = 4)		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
	Moyenne	< L.D.	3.573	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	22.06	< L.D.	5.457	0.011
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.37	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	N.D.	> 25 %	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	< 10 %	N.D.	> 25 %	< 15 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0.002	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	> 25 %	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	< L.D.	0.063	< L.D.	10.39	0.016	25.84	< L.D.	0.015	< L.D.	7.83	< L.D.
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	2.17	N.D.	16.94	N.D.	N.D.	N.D.	2.52	N.D.
	Incertitude sur la mesure	N.D.	> 25 %	N.D.	< 5 %	> 25 %	< 5 %	N.D.	> 25 %	N.D.	> 25 %	N.D.
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	< L.D.	< L.D.	0.001	< L.D.	6.492	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	
	Ecart-type	N.D.	N.D.	0	N.D.	0.146	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	Incertitude sur la mesure	N.D.	N.D.	> 25 %	N.D.	> 25 %	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour le chlorure de potassium (60 %) sont présentés dans le Tableau 69.

Tableau 69. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le chlorure de potassium (60 %) (données du CARAH).

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
Chlorure de potassium (60%) (n = 4)		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	0,086	0,019	0,264	0,525	0,009	0,054	0,151	0,968	< L.D.	0,536
	Ecart-type	0,064	N.D.	0,151	0,356	N.D.	0,014	0,068	0,587	N.D.	0,333

c. Kaïnite

Résultats du SARM

Comme le chlorure de potassium 40 % et 60 %, la kaïnite ne contient pas d'ETM en quantités très élevées. Les teneurs sont généralement basses voire sous la L.D. Le Pb, le Sr et surtout le Rb se retrouvent néanmoins en des quantités plus importantes (Tableau 70).

Tableau 70. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans la kaïnite (données du SARM).

Kaïnite (n = 4)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
	Moyenne	< L.D.	7.53	< L.D.	< L.D.	< L.D.	1.486	0.268	23.78	< L.D.	6	0.098
	Ecart-type	N.D.	3.60	N.D.	N.D.	N.D.	0.662	0.043	2.29	N.D.	N.D.	0.044
	Incertitude sur la mesure	N.D.	> 25 %	N.D.	N.D.	N.D.	< 10 %	> 25 %	< 10 %	N.D.	> 25 %	< 15 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	0.054	0.026	0.637	0.106	< L.D.	0.126	0.018	< L.D.	0.763	0.011	< L.D.
	Ecart-type	0.027	0.012	0.245	0.046	N.D.	0.119	0.008	N.D.	0.354	0.003	N.D.
	Incertitude sur la mesure	> 25 %	< 10 %	> 25 %	< 5 %	N.D.	< 15 %	> 25 %	N.D.	< 10 %	< 10 %	N.D.
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	0.317	0.655	< L.D.	4.930	0.169	11.05	< L.D.	0.129	< L.D.	95.5	0.032
	Ecart-type	0.145	0.307	N.D.	1.136	0.078	2.02	N.D.	0.056	N.D.	30.6	0.013
	Incertitude sur la mesure	< 15 %	< 10 %	N.D.	< 10 %	< 10 %	< 5 %	N.D.	< 10 %	N.D.	< 5 %	> 25 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	0.016	0.274	0.008	0.143	8.83	< L.D.	0.597	0.055	12.00	5.52	
	Ecart-type	0.008	0.129	0.004	0.053	1.03	N.D.	0.265	0.026	N.D.	5.71	
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 15 %	> 25 %	< 15 %	> 25 %	N.D.	> 25 %	> 25 %	> 25 %	> 25 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour la kaïnite sont présentés dans le Tableau 71.

Tableau 71. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans la kaïnite (données du CARAH).

Kaïnite (n = 4)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	0,212	0,013	0,738	0,271	0,011	0,195	0,910	0,128	< L.D.	0,642
	Ecart-type	0,082	N.D.	0,340	0,048	N.D.	0,014	0,644	N.D.	N.D.	0,219

d. Sulfate de potassium

Résultats du SARM

Le sulfate de potassium contient lui aussi peu d'ETM par rapport aux autres types d'engrais minéraux (Tableau 72). Seulement 7 ETM sur les 43 se trouvent au-dessus de la L.D. Le Ba et l'Ho se trouvent en des quantités inférieures aux autres engrais potassiques. Comme pour les autres engrais potassiques, le Pb et le Rb sont les ETM qui se trouvent en plus grandes quantités.

Tableau 72. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le sulfate de potassium (données du SARM).

Sulfate de potassium (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
	Moyenne	< L.D.	1.507	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	N.D.	> 25 %	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0.002	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	> 25 %	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	< L.D.	< L.D.	< L.D.	8.65	< L.D.	14.73	< L.D.	< L.D.	< L.D.	61.44	< L.D.
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	N.D.	N.D.	N.D.	< 10 %	N.D.	< 5 %	N.D.	N.D.	N.D.	< 5 %	N.D.
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	< L.D.	< L.D.	0.001	0.077	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	< L.D.	
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	Incertitude sur la mesure	N.D.	N.D.	> 25 %	> 25 %	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour le sulfate de potassium sont présentés dans le Tableau 73.

Tableau 73. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le sulfate de potassium (données du CARAH).

Sulfate de potassium (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	0,074	0,024	0,183	0,229	< L.D.	0,191	0,092	0,187	< L.D.	0,267
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

e. Haspargit

Résultats du SARM

L'haspargit contient des quantités généralement peu élevées d'ETM (Tableau 74). Soulignons cependant la présence de Be, Bi, Cu, Rb, Sb, Sn et Sr qui se trouvent à des teneurs intermédiaires par rapport aux autres engrais minéraux. L'Haspargit est le deuxième engrais minéral contenant le plus de Bi avec 0,173 mg Bi/ kg M.B. et le premier contenant du Sn avec 7,352 mg Sn/kg M.B.

Tableau 74. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans l'haspargit (données du SARM).

Haspargit (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
	Moyenne	< L.D.	63.62	< L.D.	0.173	0.260	1.557	0.527	9.587	0.129	24.50	0.197
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	N.D.	< 5 %	N.D.	> 25 %	> 25 %	< 10 %	> 25 %	> 25 %	> 25 %	< 10 %	< 10 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	0.116	0.048	0.196	0.214	< L.D.	0.088	0.041	< L.D.	1.250	0.016	1.779
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 10 %	> 25 %	< 5 %	N.D.	> 25 %	> 25 %	N.D.	< 5 %	< 10 %	< 10 %
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	0.150	0.997	< L.D.	6.245	0.254	26.28	2.030	0.209	7.352	128.8	0.015
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 15 %	< 10 %	N.D.	< 10 %	< 10 %	< 5 %	< 10 %	< 10 %	< 15 %	< 5 %	> 25 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	0.032	0.142	0.016	1.103	4.793	< L.D.	1.823	0.102	72.42	3.733	
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 15 %	> 25 %	< 15 %	> 25 %	N.D.	> 25 %	< 10 %	< 10 %	> 25 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour l'haspargit sont présentés dans le Tableau 75.

Tableau 75. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans l'haspargit (données du CARAH).

Haspargit (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	0,689	0,213	1,674	11,07	0,011	1,005	1,022	13,13	< L.D.	28,31
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

4.1.6. Engrais composés

a. NPK composé 5-10-30

Résultats du SARM

L'engrais composé 5-10-30 a plutôt tendance à être moins riche en la plupart des ETM analysés. Le Cd, Cr, Cs, Lu, Sr, Tm, U, V et Zn se trouvent en quantités intermédiaires par rapport aux autres engrais minéraux (Tableau 76).

L'ETM se trouvant en relativement plus grandes quantités est le Rb avec 29,58 mg/kg M.B. Les deux engrais minéraux qui contiennent plus de Rb sont l'engrais complexe 0-11-11 et le chlorure de potassium 40 %.

Tableau 76. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans l'engrais NPK composé 5-10-30 (données du SARM).

Composé 5-10-30 (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
		As	**Ba**	**Be**	**Bi**	**Cd**	**Ce**	**Co**	**Cr**	**Cs**	**Cu**	**Dy**
	Moyenne	1.947	35.75	< L.D.	< L.D.	2.005	2.793	< L.D.	65.12	0.370	10.94	0.687
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	> 25 %	< 10 %	N.D.	N.D.	< 15 %	< 10 %	N.D.	< 5 %	> 25 %	< 10 %	< 10 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	0.602	0.133	0.375	0.631	< L.D.	0.084	0.173	< L.D.	3.217	0.187	1.182
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	N.D.	> 25 %	< 10 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	0.156	2.176	6.080	2.338	0.521	29.58	0.304	0.471	< L.D.	205.6	0.014
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 15 %	< 5 %	> 25 %	< 10 %	< 10 %	< 5 %	> 25 %	< 10 %	N.D.	< 5 %	> 25 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	0.096	0.568	0.108	28.73	34.61	< L.D.	11.92	0.897	83.97	6.433	
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 15 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	N.D.	< 5 %	< 10 %	< 10 %	> 25 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour l'engrais composé 5-10-30 sont présentés dans le Tableau 77.

Tableau 77. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans l'engrais NPK composé 5-10-30 (données du CARAH).

Composé 5-10-30 (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	**Cd**	**Cr**	**Cu**	**Hg**	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Se**	**Zn**
	Moyenne	1,200	2,372	23,43	3,894	0,016	0,798	3,367	0,952	< L.D.	45,90
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

b. NPK composé 18-6-5

Résultats du SARM

L'engrais composé 18-6-30 contient des quantités généralement intermédiaires pour la plupart des ETM analysés (Tableau 78). Le Cd, Co, Ga, Mo, Ni et Sb dans cet engrais ont même tendance à être

parmi les engrais dont les teneurs sont les plus faibles. Le Cs est un ETM qui se trouve en quantités plus significatives dans le 18-6-5 par rapport aux autres engrais minéraux.

Tableau 78. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans l'engrais NPK composé 18-6-5 (données du SARM).

Composé 18-6-5 (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
		As	**Ba**	**Be**	**Bi**	**Cd**	**Ce**	**Co**	**Cr**	**Cs**	**Cu**	**Dy**
	Moyenne	16.30	210.2	< L.D.	< L.D.	1.555	40.31	0.614	35.89	0.449	33.79	3.552
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 5 %	N.D.	N.D.	< 15 %	< 5 %	> 25 %	< 10 %	> 25 %	< 10 %	< 5 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	1.918	1.308	0.763	4.577	< L.D.	0.188	0.712	< L.D.	24.47	0.244	1.209
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	N.D.	< 15 %	< 10 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	3.176	21.68	6.541	7.703	5.585	12.90	0.364	4.148	< L.D.	121.9	0.197
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 5 %	> 25 %	< 10 %	< 5 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	< 15 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	0.628	2.753	0.259	28.96	43.68	< L.D.	29.47	1.556	98.3	12.53	
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %	< 15 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour l'engrais composé 18-6-5 sont présentés dans le Tableau 79.

Tableau 79. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans l'engrais NPK composé 18-6-5 (données du CARAH).

Composé 18-6-5 (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	**Cd**	**Cr**	**Cu**	**Hg**	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Se**	**Zn**
	Moyenne	4,586	1,216	18,80	12,08	0,027	0,887	4,979	4,820	< L.D.	53,26
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

c. PK poudre 0-6-12

Résultats du SARM

L'engrais 0-6-12 en poudre contient des quantités intermédiaires en As, Ba, Hf, Ni, Sr et Zr et plus importantes en Co, Mo, Rb et Sn (Tableau 80).

Le PK poudre 0-6-12 détient des records de teneurs pour cinq ETM que sont le Bi, Cu, Pb, Sb et Zn. Les teneurs en ces cinq ETM sont respectivement de 0,501, 179,0, 117,7, 5,476 et 846,3 mg/kg M.B.

Le Co se trouve en moyenne à 3,373 mg/kg M.B. dans le PK poudre 0-6-12 avec une incertitude sur la mesure < 15 %. Otero *et al.* (2005) mentionnent une teneur inférieure à 0,2 pour l'engrais 8-6-20 et de 2,3 pour l'engrais 5-7-10.

Le PK poudre 0-6-12 contient en moyenne 179,0 mg Cu/kg M.B. avec moins de 5 % d'incertitude sur la mesure. Le rapport bibliographique mentionne une teneur en Cu de 20 mg/kg M.S. dans les engrais de type PK superpotassique. L'engrais analysé est donc beaucoup plus riche en Cu que ce que mentionne la littérature.

Tableau 80. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans l'engrais PK poudre 0-6-12 (données du SARM).

Composé 0-6-12 (poudre) (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
	Moyenne	19.27	61.76	< L.D.	0.501	0.871	4.795	3.373	23.52	0.193	179.0	0.636
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 5 %	N.D.	> 25 %	> 25 %	< 10 %	< 15 %	< 10 %	> 25 %	< 5 %	< 10 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	0.388	0.138	0.963	0.646	0.198	0.390	0.131	< L.D.	3.434	0.057	6.623
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	> 25 %	< 15 %	< 10 %	N.D.	< 5 %	< 10 %	< 10 %
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	0.819	2.885	11.27	117.7	0.719	26.25	5.476	0.601	5.646	161.0	0.085
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 15 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	< 10 %	< 5 %	< 10 %	< 10 %	< 15 %	< 5 %	> 25 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	0.100	0.772	0.058	3.423	12.53	< L.D.	5.622	0.366	846.3	15.87	
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 15 %	> 25 %	< 15 %	< 10 %	N.D.	> 25 %	< 10 %	< 10 %	< 15 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour l'engrais composés 0-6-12 se trouvent dans le Tableau 81. Nous pouvons y voir que le Hg se trouve à une concentration de 0,367 mg/kg M.B., ce qui est de loin la teneur la plus élevée pour les engrais minéraux.

Tableau 81. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans l'engrais PK poudre 0-6-12 (données du CARAH).

Composé 0-6-12 (poudre) (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	9,79	0,607	3,715	107,9	0,367	3,257	3,014	51,65	0,425	253,9
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

d. Phosphate diammonium

Résultats du SARM

Le phosphate diammonium contient des quantités relativement importantes en ETM (Tableau 82). Quatre ETM se trouvent sous la L.D., sept en des quantités relativement faibles (Ba, Cu, Ni, Pb, Sb, U et Zn), une majeure partie en quantités intermédiaires (particulièrement Ge, La, Nb, Sm, Tb et Th) et sept en quantités plus importantes (Cd, Ce, Eu, Ga, Nd, Pr et Ta). Parmi ces derniers, le Cd est particulièrement présent. Le phosphate diammonium est en effet l'engrais composé le plus riche en Cd avec 22,89 mg Cd/kg M.B.

Cette teneur est similaire à celle qui avait été relevée dans la revue bibliographique avec 21 mg/kg M.S. dans les engrais composés NP.

Tableau 82. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le phosphate diammonium (données du SARM).

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
Phosphate diammonium (n = 4)		**As**	**Ba**	**Be**	**Bi**	**Cd**	**Ce**	**Co**	**Cr**	**Cs**	**Cu**	**Dy**
	Moyenne	5.864	6.17	0.707	< L.D.	22.89	180.8	1.715	94.29	0.271	15.24	9.03
	Ecart-type	3.259	3.49	0.184	N.D.	N.D.	179.1	0.278	N.D.	0.149	3.53	8.53
	Incertitude sur la mesure	> 25 %	> 25 %	> 25 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 15 %	< 5 %	> 25 %	< 10 %	< 5 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	4.284	4.599	2.482	13.91	0.336	0.291	1.633	< L.D.	88.9	0.500	1.660
	Ecart-type	3.595	4.539	1.017	13.64	N.D.	0.079	1.475	N.D.	87.7	0.221	1.066
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 5 %	< 8 %	< 5 %	> 25 %	< 15 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	14.07	84.5	9.62	0.792	25.36	7.38	0.479	15.04	< L.D.	208.1	1.120
	Ecart-type	7.84	83.6	3.10	0.144	25.12	5.50	N.D.	14.86	N.D.	194.2	0.062
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 5 %	> 25 %	> 25 %	< 5 %	< 10 %	> 25 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	< 10 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	1.743	9.36	0.571	14.81	82.4	< L.D.	65.2	3.485	61.32	19.15	
	Ecart-type	1.689	8.01	0.425	10.84	21.9	N.D.	53.9	2.181	27.92	3.97	
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %	< 15 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour le phosphate diammonium sont présentés dans le Tableau 83.

Tableau 83. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le phosphate diammonium (données du CARAH).

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
Phosphate diammon-ium (n = 4)		**As**	**Cd**	**Cr**	**Cu**	**Hg**	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Se**	**Zn**
	Moyenne	2,729	9,41	35,60	11,45	0,038	1,280	4,024	0,133	0,250	45,20
	Ecart-type	2,152	9,34	30,31	3,95	0,029	0,326	2,190	N.D.	N.D.	23,15

e. PK composé 0-7-30

Résultats du SARM

L'engrais composé 0-7-30 contient des quantités généralement intermédiaires voire relativement basses en ETM (Tableau 84). C'est particulièrement le cas pour l'As, Be, Co, Cu, Hf, Mo, Nb, Ni, Pb, Sb, Ta, Th, Zn et Zr qui se trouvent en quantités plus faibles. *A contrario*, par rapport aux autres engrais minéraux, les teneurs en La, Sr, Tm et particulièrement le Rb se trouvent dans une gamme de valeurs plus importantes.

Tableau 84. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans l'engrais PK composé 0-7-30 (données du SARM).

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
Composé 0-7-30 (n = 2)		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
	Moyenne	3.811	65.72	0.450	< L.D.	4.715	68.74	0.418	81.44	0.271	16.52	6.232
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	> 25 %	< 5 %	> 25 %	N.D.	< 15 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	> 25 %	< 10 %	< 5 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	4.078	1.938	0.865	7.587	< L.D.	0.166	1.388	< L.D.	63.46	0.644	1.257
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	N.D.	< 15 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	0.419	41.42	10.11	3.782	10.59	24.07	0.704	7.260	< L.D.	626.2	0.040
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 15 %	< 5 %	> 25 %	< 10 %	< 5 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	> 25 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	1.018	2.063	0.586	31.83	49.02	< L.D.	69.91	3.773	90.10	10.72	
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	< 10 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %	< 15 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour l'engrais composé 0-7-30 sont présentés dans le Tableau 85.

Tableau 85. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans l'engrais PK composé 0-7-30 (données du CARAH).

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
Composé 0-7-30 (n = 2)		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	1,937	3,498	25,86	8,109	0,022	0,790	5,736	5,51	0,300	34,09
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

f. PK composé 0-11-11

Résultats du SARM

L'engrais PK composé 0-11-11 a des teneurs en ETM généralement intermédiaires. Pour le Ce, Cr, Dy, Er, Gd, La, Lu, Nd et Y les teneurs se trouvent plutôt dans une gamme de valeurs supérieures par rapport à l'ensemble des engrais minéraux (Tableau 86).

Le Rb est dosé à 32,84 mg/kg M.B. dans le 0-11-11 ; c'est la teneur la plus élevée en Rb recensée parmi tous les engrais minéraux analysés. Le Sr est lui aussi présent en abondance avec 1366 mg/kg M.B. (deuxième après le superphosphate et ses 2356,5 mg Sr/kg M.B.).

Tableau 86. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans l'engrais PK composé 0-11-11 (données du SARM).

Composé 0-11-11 (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
	Moyenne	3.154	29.17	1.112	0.111	8.858	114.6	0.713	149.9	0.184	15.20	12.90
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	> 25 %	< 10 %	> 25 %	> 25 %	< 15 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	> 25 %	< 10 %	< 5 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	7.484	3.856	1.353	15.38	0.250	0.191	2.599	< L.D.	83.35	1.062	2.094
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 5 %	< 8 %	< 5 %	> 25 %	< 15 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	0.678	77.37	12.80	11.41	18.51	32.84	0.766	15.59	< L.D.	1366	0.053
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 15 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	< 5 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	> 25 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	2.144	7.854	1.059	29.03	39.34	< L.D.	118.0	6.626	103.9	14.96	
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 10 %	< 5 %	< 10 %	< 10 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %	< 15 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour l'engrais composé 0-11-11 se trouvent dans le Tableau 87. Nous pouvons y voir que le Se se trouve à une concentration de 4,615 mg/kg M.B., ce qui représente la teneur de loin la plus élevée par rapport aux autres engrais minéraux analysés.

Tableau 87. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans l'engrais PK composé 0-11-11 (données du CARAH).

Composé 0-11-11 (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	1,648	7,825	51,37	8,226	0,016	1,520	3,659	7,018	4,615	35,92
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

g. PK composé 0-14-16

Résultats du SARM

L'engrais composé 0-14-16 n'est pas particulièrement riche en ETM mais contient des quantités généralement intermédiaires. Le Rb, Sr, Tm, Yb, et Zn sont parmi les ETM qui tendent le plus vers des teneurs de gamme de valeurs plus élevées (Tableau 88).

Tableau 88. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans l'engrais composé 0-14-16 (données du SARM).

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
Composé 0-14-16 (n = 1)		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
	Moyenne	5.783	86.01	0.766	< L.D.	7.306	37.73	0.772	108.8	0.177	47.81	7.538
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	> 25 %	< 5 %	> 25 %	N.D.	< 15 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	> 25 %	< 10 %	< 5 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	5.308	1.823	1.036	7.896	0.163	0.364	1.693	< L.D.	46.56	0.897	2.241
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 5 %	< 8 %	< 5 %	> 25 %	< 15 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	0.74	33.37	17.02	3.545	7.937	21.99	0.981	6.741	< L.D.	723.5	0.118
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 15 %	< 5 %	> 25 %	< 10 %	< 5 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	< 15 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	1.152	2.564	0.795	54.67	73.31	< L.D.	93.17	5.188	258.7	21.33	
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 10 %	< 10 %	< 5 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %	< 15 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour l'engrais composé 0-14-16 sont présentés dans le Tableau 89.

Tableau 89. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans l'engrais composé 0-14-16 (données du CARAH).

Composé 0-14-16 (n = 1)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	3,325	4,461	41,01	21,97	0,030	1,398	6,739	1,498	0,740	92,84
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

h. NP composé 12-27-0

Résultats du SARM

L'engrais composé 12-27-0 est l'engrais qui contient le plus d'ETM parmi tous les engrais minéraux analysés (Tableau 90). Si les teneurs en As, Pb et Sr sont relativement basses, les teneurs en tous les autres ETM sont élevées.

Ainsi, le Cd, Ce, Cu, La, Mo, Nd et Sn sont compris dans une gamme de valeurs intermédiaires et le Dy, Gd, Ho, Lu, Rb, Sb, Tb, Tm, Y, Yb, Zn et Zr dans la gamme de valeurs élevées.

De plus, le 12-27-0 contient les teneurs les plus élevées pour le Ba (3394 mg/kg M.B), Be (4,043 mg/kg M.B), Co (4,656 mg/kg M.B), Cr (368,2 mg/kg M.B), Cs (1,565 mg/kg M.B), Er (10,55 mg/kg M.B), Eu (4,639 mg/kg M.B), Ga (19,34 mg/kg M.B), Ge (0,909 mg/kg M.B), Nb (25,31 mg/kg M.B), Ni (67,63 mg/kg M.B), Ta (1,410 mg/kg M.B), Th (34,69 mg/kg M.B), U (410,5 mg/kg M.B), V (597,8 mg/kg M.B) et W (0,727 mg/kg M.B).

Dans une étude espagnole menée en 2005 (Otero *et al.*, 2005), la teneur en Ba dans un engrais composé 12-61-0 était < 50 ppm. Parmi tous les engrais minéraux analysés dans cette étude seuls deux engrais composés 12-12-17 et un engrais composé 15-15-15 avaient une teneur supérieure à la limite de détermination et dosaient respectivement 280, 110 et 430 ppm de Ba. Ces teneurs sont

relativement inférieures à la moyenne calculée sur base des deux échantillons analysés dans notre étude.

Otero *et al.* (2010) mentionnent une teneur en Co de 0,3 mg/kg dans l'engrais composé 12-61-0. Les teneurs sont souvent inférieures à 0,2 pour les engrais composés mais vont jusque 2,3 mg/kg pour le 5-7-10.

La revue bibliographique a mis en évidence une teneur de 248 mg Cr/kg M.S. dans les engrais du type NP, ce qui est dans le même ordre de grandeur que les valeurs mesurées.

Otero *et al.* (2010) ont relevé des teneurs inférieures à 1 mg/kg dans tous les engrais analysés sauf pour l'engrais composé 10-10-18 qui lui dosait 6 mg Cs/kg.

Tableau 90. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans l'engrais composé NP 12-27-0 (données du SARM).

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
Composé 12-27-0 (n = 2)		**As**	**Ba**	**Be**	**Bi**	**Cd**	**Ce**	**Co**	**Cr**	**Cs**	**Cu**	**Dy**
	Moyenne	1.621	3394	4.043	< L.D.	9.163	109.0	4.656	368.2	1.565	41.73	19.22
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	> 25 %	< 5 %	> 25 %	N.D.	< 15 %	< 5 %	< 15 %	< 5 %	< 10 %	< 10 %	< 5 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	10.55	4.639	4.914	19.34	0.909	0.571	3.827	< L.D.	73.04	1.525	3.304
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 5 %	< 8 %	< 5 %	> 25 %	< 15 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	25.31	45.59	67.63	2.574	11.86	27.23	3.278	12.92	< L.D.	45.27	1.410
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 5 %	< 5 %	< 10 %	< 5 %	< 5 %	< 10 %	< 5 %	N.D.	< 10 %	< 10 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	3.049	34.69	1.458	410.5	597.8	0.727	161.1	9.360	576.6	53.12	
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 5 %	< 5 %	< 5 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	< 5 %	< 10 %	< 8 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour l'engrais composé 12-27-0 se trouvent dans le Tableau 91. Nous pouvons y voir que le Hg se trouve à une concentration de 0,076 mg/kg M.B. Cette teneur est relativement élevée par rapport aux autres engrais minéraux analysés.

Tableau 91. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans l'engrais composé NP 12-27-0 (données du CARAH).

Composé 12-27-0 (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	**Cd**	**Cr**	**Cu**	**Hg**	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Se**	**Zn**
	Moyenne	0,748	6,616	220,6	25,60	0,076	3,419	38,05	0,896	0,395	376,2
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

4.1.7. Engrais calcaro-magnésiens

a. Dolomie

Résultats du SARM

Les teneurs en ETM dans la dolomie se trouvent dans une gamme intermédiaire voire basse de teneurs. Les trois ETM se trouvant en plus grandes quantités par rapport aux autres engrais

minéraux sont le Bi, Pb et W avec des teneurs respectives de 0,122, 16,92 et 0,373 mg/kg M.B. (Tableau 92).

La revue bibliographique mentionnait des teneurs en Pb se trouvant dans une fourchette allant de 0,05 à 19 mg Pb/kg M.S.

Tableau 92. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans la dolomie (données du SARM).

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
Dolomie (n = 4)	Moyenne	1.499	24.24	< L.D.	0.122	0.547	5.417	0.815	10.81	0.238	13.97	1.000
	Ecart-type	0.386	14.84	N.D.	0.012	0.067	1.491	0.366	2.58	N.D.	6.03	0.114
	Incertitude sur la mesure	> 25 %	< 10 %	N.D.	> 25 %	> 25 %	< 10 %	> 25 %	< 10 %	> 25 %	< 10 %	< 10 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	0.600	0.238	0.529	1.087	< L.D.	0.116	0.211	< L.D.	5.939	0.078	< L.D.
	Ecart-type	0.074	0.038	0.250	0.138	N.D.	0.044	0.024	N.D.	1.081	0.010	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	N.D.	< 15 %	< 10 %	N.D.	< 5 %	< 10 %	N.D.
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	0.353	4.870	5.705	16.92	1.190	2.691	0.304	1.001	< L.D.	88.83	0.029
	Ecart-type	0.213	0.816	N.D.	1.962	0.213	1.648	N.D.	0.152	N.D.	7.60	0.014
	Incertitude sur la mesure	< 15 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	< 5 %	< 10 %	> 25 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	> 25 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	0.160	0.483	0.086	2.114	9.27	0.373	10.54	0.509	58.88	4.785	
	Ecart-type	0.020	0.197	0.012	0.369	1.23	N.D.	1.37	0.069	8.93	1.615	
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 15 %	> 25 %	< 15 %	> 25 %	> 25 %	< 5 %	< 10 %	< 10 %	> 25 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour la dolomie sont présentés dans le Tableau 93.

Tableau 93. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans la dolomie (données du CARAH).

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
Dolomie (n = 4)	Moyenne	0,421	0,620	3,725	14,97	0,021	0,537	1,802	8,73	0,245	19,42
	Ecart-type	0,196	0,114	1,844	14,72	0,010	0,121	1,381	3,86	0,030	12,05

b. Carbonate de calcium

Résultats du SARM

Mis à part pour le Co et le Sr, le carbonate de calcium contient de très faibles quantités d'ETM ; 17 ETM sur les 43 se trouvent sous la L.D. Le Co est dosé à 0,432 mg/kg M.B. et le Sr à 261,8 mg/kg M.B. (Tableau 94).

Tableau 94. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le carbonate de calcium (données du SARM).

Carbonate de calcium (poudre) (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
	Moyenne	< L.D.	2.782	< L.D.	< L.D.	0.255	0.627	0.432	< L.D.	< L.D.	< L.D.	0.183
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	N.D.	> 25 %	N.D.	N.D.	> 25 %	> 25 %	> 25 %	N.D.	N.D.	N.D.	< 10 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	0.146	0.029	< L.D.	0.156	< L.D.	0.041	0.047	< L.D.	0.755	0.023	< L.D.
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 10 %	N.D.	< 5 %	N.D.	> 25 %	> 25 %	N.D.	< 10 %	< 10 %	N.D.
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	0.105	0.563	< L.D.	< L.D.	0.136	0.472	< L.D.	0.122	< L.D.	261.8	< L.D.
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 15 %	< 10 %	N.D.	N.D.	< 10 %	> 25 %	N.D.	< 10 %	N.D.	< 5 %	N.D.
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	0.026	0.053	0.021	0.693	3.201	< L.D.	2.801	0.139	< L.D.	1.572	
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	> 25 %	> 25 %	< 15 %	> 25 %	N.D.	> 25 %	< 10 %	N.D.	> 25 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour le carbonate de calcium sont présentés dans le Tableau 95.

Tableau 95. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le carbonate de calcium (données du CARAH).

Carbonate de calcium (poudre) (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	0,122	0,330	1,679	0,344	0,019	0,384	0,762	1,445	< L.D.	1,225
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

c. Maerl

Résultats du SARM

Le maerl contient de très faibles quantités en tous les ETM sauf pour le Pb (Tableau 96). Avec 25,27 mg Pb/kg M.B., le maerl se trouve juste après l'engrais composé PK 0-6-12 dans le classement des engrais minéraux les plus chargés en Pb.

Les ETM comme le Co, Cs, Sm, Sr, Tm et Yb se trouvent en quantités un peu plus élevées que les autres ETM.

Tableau 96. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le maerl (données du SARM).

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
Maerl (n = 2)		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
	Moyenne	< L.D.	13.18	< L.D.	< L.D.	0.686	4.971	0.465	9.103	0.148	5.532	0.912
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	N.D.	< 10 %	N.D.	N.D.	> 25 %	< 10 %	> 25 %	> 25 %	> 25 %	> 25 %	< 10 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	0.538	0.215	< L.D.	0.959	< L.D.	0.042	0.190	< L.D.	4.932	0.069	< L.D.
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 10 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	N.D.	> 25 %	< 10 %	N.D.	< 5 %	< 10 %	N.D.
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	0.126	4.283	< L.D.	25.27	1.023	2.143	< L.D.	0.888	< L.D.	106.7	0.013
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 15 %	< 5 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %	N.D.	< 10 %	N.D.	< 5 %	> 25 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	0.145	0.325	0.073	1.918	6.762	< L.D.	9.342	0.451	69.77	1.958	
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 15 %	> 25 %	< 15 %	> 25 %	N.D.	> 25 %	< 10 %	< 10 %	> 25 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour le maerl sont présentés dans le Tableau 97.

Tableau 97. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le maerl (données du CARAH).

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
Maerl (n = 2)		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	0,476	0,678	2,934	4,054	0,018	0,718	0,811	9,76	0,340	23,94
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

d. Kiésérite

Résultats du SARM

La kiésérite est un engrais magnésien qui ne contient pas des quantités importantes en ETM, sept ETM sont d'ailleurs sous la L.D. (Tableau 98). Les teneurs les plus importantes sont pour le Bi, Er, Ho, Sm et Yb qui se trouvent dans une gamme de valeurs intermédiaires par rapport aux autres engrais minéraux.

Tableau 98. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans la kiésérite (données du SARM).

Kiésérite (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)										
		As	Ba	Be	Bi	Cd	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Dy
	Moyenne	1.255	19.23	< L.D.	0.119	1.348	19.06	0.200	22.23	< L.D.	9.196	2.070
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	> 25 %	< 10 %	N.D.	> 25 %	< 15 %	< 5 %	> 25 %	< 10 %	N.D.	> 25 %	< 5 %
	Paramètre	**Er**	**Eu**	**Ga**	**Gd**	**Ge**	**Hf**	**Ho**	**In**	**La**	**Lu**	**Mo**
	Moyenne	1.236	0.700	0.452	2.572	< L.D.	0.066	0.437	< L.D.	13.78	0.176	0.706
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 5 %	> 25 %	< 5 %	N.D.	> 25 %	< 10 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	> 25 %
	Paramètre	**Nb**	**Nd**	**Ni**	**Pb**	**Pr**	**Rb**	**Sb**	**Sm**	**Sn**	**Sr**	**Ta**
	Moyenne	0.895	12.28	5.676	1.202	3.082	3.804	< L.D.	2.323	< L.D.	89.45	0.070
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
	Incertitude sur la mesure	< 15 %	< 5 %	> 25 %	< 10 %	< 5 %	< 10 %	N.D.	< 5 %	N.D.	< 5 %	> 25 %
	Paramètre	**Tb**	**Th**	**Tm**	**U**	**V**	**W**	**Y**	**Yb**	**Zn**	**Zr**	
	Moyenne	0.347	1.295	0.091	5.06	19.57	< L.D.	21.24	1.119	56.76	4.526	
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	
	Incertitude sur la mesure	< 5 %	< 10 %	> 25 %	< 15 %	< 10 %	N.D.	< 5 %	< 5 %	< 10 %	> 25 %	

Résultats du CARAH

Les résultats d'analyses réalisées par le CARAH pour la kiésérite sont présentés dans le Tableau 99.

Tableau 99. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans la kiésérite (données du CARAH).

Kiésérite (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg M.B.)									
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mo	Ni	Pb	Se	Zn
	Moyenne	0,393	0,454	8,83	4,226	0,017	0,578	1,759	0,742	0,480	18,20
	Ecart-type	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

4.2. Engrais de ferme

4.2.1. ETM

En ce qui concerne les engrais de ferme, les analyses ETM ont été réalisées par les laboratoires du Centre de Michamps et de Tinlot-Scry. Les résultats issus des deux laboratoires d'analyse ont été synthétisés de manière groupée dans les tableaux présentés dans cette partie.
Notons que pour les analyses réalisées par le laboratoire de Tinlot-Scry, la L.D. pour le Ba, Be, Li, Se, Sr et V dans les engrais de ferme est de 6 mg/kg M.S.

a. Bovins

Lisiers

Les lisiers de bovins lait en zone herbagère sont relativement chargés en Co, Pb, Sr et particulièrement en Cd. Cette catégorie d'engrais de ferme est celle qui contient le plus de Cd avec 0,53 mg/kg M.S. (Tableau 100).

Les lisiers de bovins lait en zone polyculture/élevage contiennent plus d'As, Cu et Mo que la catégorie précédente, en zone herbagère.

Le lisier de bovin viande en zone herbagère contient des quantités relativement élevées de Ba, Cr, Hg, Pb et V. Parmi ceux-ci, le Ba, Cr, Hg, et V se trouvent en des quantités supérieures par rapport aux deux autres catégories de lisier de bovin.

Tableau 100. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le lisier de bovin lait en zone herbagère et en zone polyculture/élevage et dans le lisier de bovin viande en zone herbagère.

	Paramètre	Teneur (mg/kg MS)							
Lisier de bovin lait en zone herbagère (n = 9)		As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Hg
	Moyenne	0.21	48.6	< L.D.	0.53	3.35	8.02	51.70	0.05
	Ecart-type	0.21	13.9	N.D.	0.35	0.83	3.24	19.75	0.01
	Paramètre	**Li**	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Se**	**Sr**	**V**	**Zn**
	Moyenne	< L.D.	3.09	31.50	0.29	< L.D.	66.2	9.1	278.17
	Ecart-type	N.D.	2.39	25.21	0.20	N.D.	14.0	1.8	86.52
Lisier de bovin lait en zone polyculture/élevage (n = 8)	**Paramètre**	**Teneur (mg/kg MS)**							
		As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Hg
	Moyenne	0.51	34.6	< L.D.	0.33	2.72	6.15	81.58	0.05
	Ecart-type	0.84	4.3	N.D.	0.17	1.02	1.28	28.20	0.01
	Paramètre	**Li**	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Se**	**Sr**	**V**	**Zn**
	Moyenne	< L.D.	5.94	26.53	0.12	< L.D.	61.0	6.7	281.97
	Ecart-type	N.D.	4.10	7.06	0.03	N.D.	9.5	0.8	77.96
Lisier de bovin viande en zone herbagère (n = 7)	**Paramètre**	**Teneur (mg/kg MS)**							
		As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Hg
	Moyenne	0.57	138	< L.D.	0.45	2.83	9.03	34.27	0.07
	Ecart-type	0.55	223	N.D.	0.23	1.56	3.70	8.90	0.02
	Paramètre	**Li**	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Se**	**Sr**	**V**	**Zn**
	Moyenne	< L.D.	4.74	24.49	0.20	< L.D.	55	11.9	192.44
	Ecart-type	N.D.	3.04	9.93	0.07	N.D.	24	2.1	54.39

Fumiers

Par rapport aux autres catégories d'engrais de ferme, les fumiers de bovins ne contiennent pas de grandes quantités d'ETM mis à part le V pour la catégorie fumier de bovin viande en zone polyculture/élevage avec 17,7 mg V/kg M.S. Il faut cependant noter que cette valeur est issue d'un seul échantillon sur les dix échantillons analysés pour cette catégorie. Cette valeur est très probablement ponctuelle ; la teneur réelle en V dans les fumiers se trouvant plus que probablement aux alentours de la L.D. (6 mg V/kg M.S.), comme le montrent les trois autres catégories de fumier (Tableau 101).

Le fumier de bovin viandeux en zone herbagère est la catégorie d'engrais de ferme la plus chargée en Li. Cette valeur moyenne a été calculée sur base d'un seul échantillon sur les 11 dont la teneur était supérieure à la L.D. La teneur moyenne se situe donc plutôt aux alentours de la L.D (6 mg Li/kg M.S.).

Tableau 101. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le fumier bovin lait en zone herbagère, dans le fumier bovin lait en zone polyculture/élevage, dans le fumier bovin viande en zone herbagère et dans le fumier bovin viande en zone polyculture/élevage.

	Paramètre	Teneur (mg/kg MS)							
Fumier de bovin lait en zone herbagère (n = 6)		**As**	**Ba**	**Be**	**Cd**	**Co**	**Cr**	**Cu**	**Hg**
	Moyenne	0.10	39.1	< L.D.	0.11	1.42	6.28	22.72	0.05
	Ecart-type	0.21	18.6	N.D.	0.11	0.79	1.97	3.94	0.01
	Paramètre	**Li**	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Se**	**Sr**	**V**	**Zn**
	Moyenne	< L.D.	4.06	23.31	0.10	< L.D.	30.8	7.8	103.30
	Ecart-type	N.D.	5.00	6.06	0.04	N.D.	3.6	N.D.	19.93
Fumier de bovin lait en zone polyculture/élevage (n = 6)	**Paramètre**	**Teneur (mg/kg MS)**							
		As	**Ba**	**Be**	**Cd**	**Co**	**Cr**	**Cu**	**Hg**
	Moyenne	0.29	40.0	< L.D.	0.22	0.90	3.53	25.13	0.05
	Ecart-type	0.40	5.9	N.D.	0.06	0.62	0.70	6.93	0.01
	Paramètre	**Li**	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Se**	**Sr**	**V**	**Zn**
	Moyenne	< L.D.	6.37	22.34	0.09	< L.D.	33.4	< L.D.	92.27
	Ecart-type	N.D.	2.52	6.64	0.04	N.D.	9.7	N.D.	13.63
Fumier de bovin viande en zone herbagère (n = 11)	**Paramètre**	**Teneur (mg/kg MS)**							
		As	**Ba**	**Be**	**Cd**	**Co**	**Cr**	**Cu**	**Hg**
	Moyenne	0.34	50.7	< L.D.	0.22	2.42	8.24	34.63	0.06
	Ecart-type	0.47	18.9	N.D.	0.17	1.77	4.70	20.69	0.01
	Paramètre	**Li**	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Se**	**Sr**	**V**	**Zn**
	Moyenne	7.80	2.05	28.16	0.12	< L.D.	54.3	8.9	174.42
	Ecart-type	N.D.	2.13	17.23	0.09	N.D.	30.2	3.7	116.62
Fumier de bovin viande en zone polyculture/élevage (n = 10)	**Paramètre**	**Teneur (mg/kg MS)**							
		As	**Ba**	**Be**	**Cd**	**Co**	**Cr**	**Cu**	**Hg**
	Moyenne	0.33	52	< L.D.	0.24	1.46	6.69	28.06	0.06
	Ecat-type	0.52	22	N.D.	0.13	0.94	3.82	16.92	0.01
	Paramètre	**Li**	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Se**	**Sr**	**V**	**Zn**
	Moyenne	5.80	6.61	24.37	0.12	< L.D.	32.2	17.7	125.44
	Ecart-type	N.D.	4.29	17.74	0.08	N.D.	12.2	N.D.	77.85

Fumiers compostés

Les fumiers compostés de bovin viandeux sont généralement plus concentrés en ETM que les autres engrais de ferme (Tableau 102). Les deux catégories de composts analysés sont relativement riches en Co.

La teneur en As dans le fumier composté de bovin viandeux en zone polyculture/élevage contient la plus forte teneur moyenne en As avec 1,24 mg/kg M.S. Cette valeur est certainement due à une contamination ponctuelle car parmi les quatre échantillons de fumier composté de bovins viandeux analysés, trois échantillons ont des teneurs se trouvant aux alentours de 0,02 mg As/kg M.S.

Cette catégorie de compost contient aussi, par rapport aux autres engrais de ferme, les quantités les plus élevées en Cr, Hg, Ni, Pb et V mais aussi des quantités élevées de Ba, de Li et de Mo.

Tableau 102. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le fumier composté de bovin viande en zone herbagère et dans le fumier composté de bovin viande en zone polyculture/élevage.

	Paramètre	Teneur (mg/kg MS)							
		As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Hg
Compost de fumier de bovin viande en zone herbagère (n = 2)	Moyenne	0.03	50.3	< L.D.	0.24	3.60	8.38	50.87	0.08
	Ecart-type	0.02	N.D.	N.D.	0.17	1.11	1.83	15.88	0.04
	Paramètre	**Li**	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Se**	**Sr**	**V**	**Zn**
	Moyenne	< L.D.	4.57	41.57	0.13	< L.D.	57.4	8.5	236.96
	Ecart-type	N.D.	4.54	17.12	0.03	N.D.	N.D.	N.D.	78.94
	Paramètre	Teneur (mg/kg MS)							
		As	**Ba**	**Be**	**Cd**	**Co**	**Cr**	**Cu**	**Hg**
Compost de fumier de bovin viande en zone polyculture/élevage (n = 2)	Moyenne	1.24	86	< L.D.	0.35	3.98	18.77	41.14	0.18
	Ecart-type	1.23	N.D.	N.D.	0.03	0.44	3.72	14.39	0.05
	Paramètre	**Li**	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Se**	**Sr**	**V**	**Zn**
	Moyenne	6.93	10.47	154.61	0.79	< L.D.	57.8	20.2	137.39
	Ecart-type	N.D.	3.71	30.27	0.45	N.D.	N.D.	N.D.	28.97

b. Porcs

Le lisier de porc à l'engraissement est plutôt riche en Cd, Mo et particulièrement en Cu et Zn dont les teneurs sont les plus élevées dans cette catégorie d'engrais de ferme. Leur teneur moyenne respective est de 256,8 mg Cu/kg M.S. et 704,9 mg Zn/kg M.S. (Tableau 103).

Tableau 103. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans le lisier porc à l'engraissement.

	Paramètre	Teneur (mg/kg MS)							
		As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Hg
Lisier de porc à l'engraissement (n = 2)	Moyenne	0.33	40.4	< L.D.	0.43	0.76	4.77	256.76	0.03
	Ecart-type	0.10	N.D.	N.D.	0.11	0.47	0.22	40.15	0.00
	Paramètre	**Li**	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Se**	**Sr**	**V**	**Zn**
	Moyenne	< L.D.	8.70	21.20	0.14	< L.D.	47.9	7.0	704.94
	Ecart-type	N.D.	1.37	4.70	0.00	N.D.	N.D.	N.D.	106.05

c. Excréments de volailles

Parmi les engrais de ferme, les fientes de volailles de chair sont plutôt riches en Cu, Mo et Zn. Les fientes de volailles de production d'œufs sont les engrais de ferme les plus riches en Mo et Sr. Elles sont aussi assez riches en Cd et Zn (Tableau 104).

Tableau 104. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans les fientes de volailles : chair et production d'œufs.

	Paramètre	Teneur (mg/kg MS)							
Fientes de volailles (chair) (n = 2)		As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Hg
	Moyenne	0.01	27.1	< L.D.	0.12	1.88	4.08	119.90	0.03
	Ecart-type	0.00	N.D.	N.D.	0.09	0.53	0.56	11.03	0.01
	Paramètre	**Li**	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Se**	**Sr**	**V**	**Zn**
	Moyenne	< L.D.	6.77	8.91	0.09	< L.D.	51.8	< L.D.	540.46
	Ecart-type	N.D.	0.81	0.34	0.03	N.D.	N.D.	N.D.	30.01
Fientes de volailles (production d'oeufs) (n = 2)	Paramètre	Teneur (mg/kg MS)							
		As	Ba	Be	Cd	Co	Cr	Cu	Hg
	Moyenne	0.01	17.7	< L.D.	0.37	0.79	5.79	78.16	0.04
	Ecart-type	0.00	N.D.	N.D.	0.15	0.15	0.45	15.52	0.00
	Paramètre	**Li**	**Mo**	**Ni**	**Pb**	**Se**	**Sr**	**V**	**Zn**
	Moyenne	< L.D.	10.68	28.24	0.10	< L.D.	112	5.6	373.87
	Ecart-type	N.D.	0.82	5.69	0.04	N.D.	N.D.	N.D.	27.24

4.2.2. CTO

Les CTO qui ont été analysés dans le cadre du projet ont été limités au HAP et PCB. Selon les recherches, ce sont les deux familles de composés organiques traces qui sont actuellement dosables par les laboratoires pour les engrais de ferme.

L'analyse des PCB a montré que les teneurs sont toutes inférieures à la L.D. (10 µg/kg sec).

En ce qui concerne les HAP, quelques substances dont les teneurs sont supérieures à la L.D. ont été détectées (Tableau 105).

Pour les fientes de volailles de production d'œufs, les HAP qui ont été détectés sont le fluorène, le phénanthrène, l'anthracène, le fluoranthène, le pyrène et le chrysène avec des teneurs respectives de 16, 111, 6, 76, 38 et 12 µg/kg M.S. Le deuxième échantillon de cette catégorie d'engrais de ferme ne contenait que du phénanthrène à hauteur de 14 µg/kg M.S.

Le lisier de porc analysé contient lui aussi du phénanthrène avec des teneurs de 43 à 51 µg/kg M.S.

Aucun HAP n'a été détecté dans le lisier de bovin viande en zone herbagère mais pour le fumier de la même catégorie des teneurs élevées en phénanthrène (56 µg/kg M.S.) ont été détectées.

Tableau 105. Teneurs en HAP dans les engrais de ferme analysés dans le cadre du projet.

HAP	Unité	Fientes de volailles (production d'œufs)		Lisier de porc à l'engraissement		Lisier de bovin viande en zone herbagère		Fumier de bovin viande en zone herbagère	
		Ech. 1	Ech. 2	Ech. 1	Ech. 2	Ech. 1	Ech. 2	Ech. 1	Ech. 2
Naphtalène	µg/kg sec	<32	<46	<92	<83	<248	<403	<73	<115
Acénaphtylène	µg/kg sec	<101	<75	<210	<96	<764	<1600	<65	<282
Acénaophtène	µg/kg sec	<34	<50	<262	<123	<264	<427	<86	<124
Fluorène	µg/kg sec	**16**	<23	<94	<51	<121	<196	<38	<56
Phénanthrène	µg/kg sec	**111**	**14**	**51**	**43**	<82	<135	<18	**56**
Anthracène	µg/kg sec	**6**	<4	<13	<8	<20	<32	<6	<9
Fluoranthène	µg/kg sec	**76**	<35	<84	<66	<190	<309	<57	<88
Pyrène	µg/kg sec	**38**	<41	<174	<92	<217	<350	<68	<101
Benzoanthracène	µg/kg sec	<13	<20	<104	<49	<106	<170	<34	<49
Chrysène	µg/kg sec	**12**	<17	<72	<39	<92	<149	<29	<43
Benzo(b)fluoranthène	µg/kg sec	<14	<20	<100	<49	<108	<174	<35	<50
Benzo(k)fluoranthène	µg/kg sec	<15	<23	<118	<56	<121	<195	<39	<57
Benzo(a)pyrène	µg/kg sec	<16	<24	<122	<58	<126	<203	<41	<59
Dibenzoanthracène	µg/kg sec	<11	<34	<91	<42	<90	<145	<29	<42
Benzo(g,h,i)pérylène	µg/kg sec	<12	<18	<100	<46	<95	<153	<31	<45
Indéno(1,2,3-c,d)pyrène	µg/kg sec	<14	<21	<117	<53	<111	<178	<36	<52
Somme 16 HAP	**µg/kg sec**	**259 - 521**	**14 - 465**	**51 - 1804**	**43 - 954**	**<2755**	**<4819**	**<685**	**56 - 1228**

4.3. Matières exogènes

Les résultats d'analyses présentés dans cette partie sont issus de données transmises par la DPS. Les données utilisées sont celles correspondant à l'année 2008 pour les boues industrielles, les boues de STEP, les composts et les écumes de sucrerie. En ce qi concerne les digestats, les données correspondent à l'année 2010.

Pour un même lot de matière valorisé en agriculture, plusieurs bulletins de résultats d'analyse sont parfois disponibles. Dans ces cas, une teneur moyenne a été calculée par lot de matière exogène[12]. Ces teneurs moyennes par lot ont ensuite été pondérées par les quantités de M.S. valorisées afin de calculer les teneurs moyennes en ETM et CTO dans les différents types de matières exogènes.

Les écart-types ont été calculés de manière non pondérée sur les moyennes calculées par lot.

4.3.1. ETM

a. Boues industrielles

Les boues industrielles sont principalement riches en Cd ; avec 1,36 mg/kg M.S., c'est la matière exogène la plus riche en Cd (Tableau 106).

Il faut cependant noter une variabilité relativement importante pour chacun des ETM. Cela provient de la diversité des secteurs d'activité produisant des boues industrielles.

Tableau 106. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans les boues industrielles.

[12] Dans le cas où, pour un paramètre donné d'un lot donné, aucune valeur d'analyse n'était renseignée, la valeur moyenne de la catégorie la plus proche à laquelle appartenait la matière exogène lui a été attribuée.

Boues industrielles	Paramètre	Teneur (mg/kg M.S.)							
		As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn
	Moyenne	2.04	1.36	23.8	15.6	0.07	13.2	15.4	169
	Ecart-type	2.96	0.49	62.6	38.9	0.36	13.6	8.0	142

b. Boues de STEP

Les boues de STEP sont les plus riches des matières exogènes en tous les ETM sauf le Cd mais même cet ETM se trouve à des teneurs relativement élevées avec 1,2 mg/kg M.S (Tableau 107).

La variabilité entre les différents échantillons de boues de STEP est un peu moins importante que pour les boues industrielles.

Tableau 107. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans les boues de STEP.

Boues STEP	Paramètre	Teneur (mg/kg M.S.)							
		As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn
	Moyenne	4.82	1.20	167	43	0.67	23	71	682
	Ecart-type	2.25	0.44	52	17	0.43	6	21	218

c. Composts

Les composts contiennent plutôt des quantités intermédiaires en ETM par rapport aux autres matières exogènes (Tableau 108). Les ETM pour lesquels les teneurs se trouvent dans une gamme de teneurs plus élevées sont l'As, le Cr, le Ni, le Pb et le Zn.

Tableau 108. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans les composts.

Composts	Paramètre	Teneur (mg/kg M.S.)							
		As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn
	Moyenne	4.20	0.78	42.9	27.0	0.14	14.2	56.8	244
	Ecart-type	1.62	0.26	17.8	10.5	0.05	4.4	24.6	102

d. Ecumes

Les écumes de sucrerie sont les matières exogènes les plus pauvres en ETM (Tableau 109). Elles contiennent en effet les teneurs les plus faibles pour sept ETM sur les huit. L'As est plus concentré dans les digestats mais la teneur de 1,75 mg As/kg M.S. des écumes se trouve dans une gamme de valeurs basses pour les matières exogènes.

Tableau 109. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans les écumes de sucreries.

Ecumes	Paramètre	Teneur (mg/kg M.S.)							
		As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn
	Moyenne	1.75	0.54	19.9	8.5	0.03	3.6	4.0	57
	Ecart-type	0.51	0.06	4.5	5.5	0.03	2.6	4.4	18

e. Digestats

Les digestats contiennent des teneurs en ETM plutôt basses par rapport aux autres matières exogènes mis à part pour le Cu qui se trouve à des teneurs intermédiaires (Tableau 110).

Tableau 110. Paramètres statistiques liés aux teneurs en ETM dans les digestats.

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.S.)							
		As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn
Digestats	Moyenne	1.46	0.60	44	15	0.07	8.7	14.9	215
	Ecart-type	0.81	0.16	22	2	0.003	1.9	21.0	43

4.3.2. CTO

a. Boues industrielles

Hormis pour les PCB totaux, les boues industrielles ne sont pas les matières exogènes les plus riches en CTO. La teneur moyenne en PCB est élevée par rapport aux autres matières mais cela est principalement dû à une valeur élevée très ponctuelle de 44 mg/kg M.S. dans une matière analysée (Tableau 111). Les teneurs les plus courantes dépassent rarement les 0,1 mg/kg M.S. ; en supprimant la valeur de 44 mg/kg M.S. de la série de données, la teneur moyenne avoisine 0,05 mg/kg M.S.

Comme pour les ETM, une grande variabilité se marque encore une fois pour les CTO dans les boues industrielles pour la même raison que précédemment.

Tableau 111. Paramètres statistiques liés aux teneurs en CTO dans les boues industrielles.

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.S.)					
		BTEX totaux	HAP 6 de Borneff	HAP totaux	PCB totaux	C9-C40 totaux	Solvants halogénés
Boues industrielles	Moyenne	0.60	0.28	1.87	1.47	74.74	0.18
	Ecart-type	18.04	0.71	6.45	7.32	196.28	0.24

b. Boues de STEP

Les boues de STEP sont relativement riches en hydrocarbures C9-C40 (Tableau 112). Elles contiennent aussi les plus hautes teneurs moyennes en BTEX et HAP que ce soit pour les 6 de Borneff ou les totaux avec des teneurs moyennes respectives de 0,71, 3,06 et 5,81 mg/kg M.S. Pour les BTEX, les teneurs maximales se trouvent néanmoins généralement aux alentours de 0,1 – 0,2 mg BTEX/kg M.S.

Tableau 112. Paramètres statistiques liés aux teneurs en CTO dans les boues de STEP.

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.S.)					
		BTEX totaux	HAP 6 de Borneff	HAP totaux	PCB totaux	C9-C40 totaux	Solvants halogénés
Boues STEP	Moyenne	0.71	3.06	5.81	0.04	245.92	0.24
	Ecart-type	1.70	2.14	3.95	0.02	163.35	0.20

c. Composts

Les composts contiennent des quantités intermédiaires de HAP (6 de Borneff et totaux) d'hydrocarbures C9 – C40 (Tableau 113).

Tableau 113. Paramètres statistiques liés aux teneurs en CTO dans les composts.

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.S.)					
		BTEX totaux	HAP 6 de Borneff	HAP totaux	PCB totaux	C9-C40 totaux	Solvants halogénés
Composts	Moyenne	0.18	1.77	3.37	0.03	135.13	0.12
	Ecart-type	0.37	0.96	1.79	0.03	109.33	2.12

d. Ecumes

Les écumes de sucrerie contiennent relativement peu de CTO. Les solvants halogénés se trouvent quant à eux dans une gamme de valeurs plus intermédiaire par rapport aux autres matières exogènes (Tableau 114).

Tableau 114. Paramètres statistiques liés aux teneurs en CTO dans les écumes de sucreries.

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.S.)					
		BTEX totaux	HAP 6 de Borneff	HAP totaux	PCB totaux	C9-C40 totaux	Solvants halogénés
Ecumes	Moyenne	0.24	0.08	0.22	0.01	5.71	0.25
	Ecart-type	0.19	0.06	0.22	0.005	62.24	0.21

e. Digestats

Les digestats contiennent des teneurs intermédiaires en HAP (Tableau 115). Les BTEX sont présents en quantités relativement importantes avec 0,66 mg BTEX/kg M.S. de digestat. Les PCB se trouvent eux aussi en quantités relativement importantes avec 0,1 mg/kg M.S. en moyenne. Les digestats ont aussi les teneurs les plus élevées en hydrocarbures C9 – C40 et en solvants halogénés.

Tableau 115. Paramètres statistiques liés aux teneurs en CTO dans les digestats.

	Paramètre	Teneur (mg/kg M.S.)					
		BTEX totaux	HAP 6 de Borneff	HAP totaux	PCB totaux	C9-C40 totaux	Solvants halogénés
Digestats	Moyenne	0.66	0.85	1.86	0.10	711.10	1.3
	Ecart-type	0.31	0.44	1.28	0.08	128.72	N.D.

4.4. Teneurs en ETM par unités d'azote

Les concentrations en éléments N, P, K des différentes matières fertilisantes peuvent varier considérablement de sorte que les quantités de matières nécessaires pour couvrir les besoins des plantes sont également très variables. Etant donné que les plans de fertilisation sont principalement déterminés sur base des quantités d'azote apportées, il peut être intéressant de voir quelles sont les matières fertilisantes apportant le plus d'ETM par unité d'azote.
La majorité des ETM pris en considération dans les paragraphes suivants sont ceux sur lesquels l'Europe insiste particulièrement en ce qui concerne leurs impacts potentiels sur l'homme et l'environnement.

4.4.1. Engrais minéraux

a. Engrais simples

Le Tableau 116 montre les teneurs de 10 ETM exprimés en mg par unité d'azote contenus dans les engrais minéraux simples azotés. On peut voir que la cyanamide calcique est l'engrais qui contient le plus d'ETM par kg de N par rapport aux autres engrais minéraux azotés présentés. Il n'y a que pour le Cd et le Pb que les teneurs sont respectivement plus élevées dans le nitrate d'ammonium et le sulfate d'ammonium. A l'inverse, l'urée et surtout la solution azotée sont relativement pauvres en ETM par unité d'azote apporté.

Tableau 116. Teneurs en ETM des engrais minéraux azotés simples exprimés par unité d'azote.

Matière	Teneur (mg ETM/kg N)									
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	U	V	Zn
Cyanamide calcique	11,4	0,3	73,3	51,3	0,12	253,4	6,4	4,5	1016,4	27,8
Nitrate d'ammonium	2,0	0,6	24,9	33,4	0,04	9,3	2,9	1,1	4,3	20,4
Nitrate d'ammonium (4% MgO)	2,0	0,2	20,3	27,2	0,09	9,3	12,4	0,6	6,5	20,4
Solution azotée	0,004	0,0005	0,02	0,02	0,13	0,02	0,002	0,0002	0,003	0,04
Sulfate d'ammonium	2,6	0,3	11,9	11,9	0,12	11,9	35,9	0,2	1,9	26,2
Urée	1,2	0,13	5,4	5,4	0,03	5,4	0,7	0,04	0,9	12,0

b. Engrais composés

On peut constater, au Tableau 117, que les teneurs en ETM dans les engrais minéraux composés azotés sont généralement supérieures dans l'engrais composé 12-27-0. L'U et le V se trouvent en des teneurs qui dépassent de près de dix fois celles présentes dans les autres engrais composés azotés considérés. Néanmoins, pour l'As, le Cd et le Pb, ce sont respectivement l'engrais composé 18-6-5, le phosphate diammonium et le 5-10-30 qui en contiennent le plus par kg d'azote apporté.

Tableau 117. Teneurs en ETM des engrais minéraux composés exprimés par unité d'azote

Matière	Teneur (mg ETM/kg N)									
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	U	V	Zn
Composé 12-27-0	13,6	77,5	3000,9	348,8	0,6	561,3	22,1	3342,2	4908,3	4747,2
Phosphate diammonium	29,8	78,4	327,7	89,2	0,2	48,5	4,4	96,2	430,0	376,4
Composé 5-10-30	38,9	40,1	1302,3	218,7	0,3	121,6	46,8	574,6	692,1	1679,4
Composé 18-6-5	90,5	8,6	199,4	187,7	0,2	36,3	42,8	160,9	242,7	546,3

4.4.2. Engrais de ferme

Les teneurs en ETM par unité d'azote dans les différentes catégories d'engrais de ferme analysées sont illustrées au Tableau 118. On peut observer que le fumier composté de bovin viandeux en exploitation polyculture/élevage contient les quantités les plus importantes en ETM par kg de N. Les valeurs de ce compost sont nettement plus élevées que celles du fumier de bovin correspondant et que les fumiers compostés prélevés en exploitation herbagères. Ces valeurs élevées dans le fumier composté polyculture/élevage proviennent certainement d'une contamination locale. Si nous comparons les autres catégories d'engrais de ferme entre elles, les fumiers de bovin viandeux contiennent des quantités plus importantes en As, Cr, Hg, Ni, Pb et V. Pour le Cu et le Zn, ce sont, les fientes de poulets de chair et les lisiers de porc à l'engraissement qui en contiennent le plus par kg de N. Par contre, c'est pour ces deux dernières catégories d'engrais de ferme que l'on trouve les teneurs les moins élevées pour les sept autres ETM présentés.

Tableau 118. Teneurs en ETM des engrais de ferme exprimés par unité d'azote.

Matière	Teneur (mg ETM/kg N)								
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	V	Zn
Fumier composté de bovin viande en zone herbagère	0,8	6,8	232,4	1411,3	2,3	1153,3	3,6	236,4	6574,4
Fumier composté de bovin viande en zone polyculture/élevage	61,2	17,1	927,1	2032,1	8,9	7637,1	39,0	995,3	6786,5
Fientes de volailles (chair)	0,12	2,2	72,3	2124,6	0,5	158,0	1,6	53,2	9577,3
Fientes de volailles (production d'oeufs)	0,11	6,0	94,4	1274,3	0,6	460,3	1,7	91,3	6095,2
Fumier de bovin lait en zone herbagère	3,7	4,1	228,1	824,7	1,7	845,9	3,6	281,3	3749,6
Fumier de bovin lait en zone polyculture/élevage	11,5	8,5	139,0	989,8	2,0	879,9	3,3	118,2	3634,9
Fumier de bovin viande en zone herbagère	13,2	8,3	319,4	1341,9	2,2	1091,3	4,6	346,2	6758,0
Fumier de bovin viande en zone polyculture/élevage	14,9	10,5	298,5	1252,6	2,7	1088,0	5,3	790,2	5599,9
Lisier de bovin lait en zone herbagère	3,7	9,0	137,8	888,4	0,9	541,3	4,9	156,8	4780,1
Lisier de bovin lait en zone polyculture/élevage	9,6	6,2	115,8	1535,4	0,9	499,2	2,3	126,2	5306,4
Lisier de bovin viande en zone herbagère	8,9	7,1	142,0	539,0	1,1	385,2	3,1	187,7	3026,7
Lisier de porc à l'engraissement	3,6	4,7	52,2	2809,5	0,3	232,0	1,5	76,6	7713,6

4.4.3. Matières exogènes

Le Tableau 119 montre les teneurs en ETM exprimées sur base azotée dans les matières exogènes. On remarque que ce sont les boues de STEP qui apportent les plus grandes quantités de Cr, Cu, Hg, Pb et Zn. Sur base azotée, les boues industrielles contiennent des teneurs les plus élevées pour le Cd et le Ni ; les teneurs en Cr sont elles aussi relativement élevées. Les composts contiennent les teneurs les plus élevées en Pb et les écumes de sucreries contiennent plus d'As par kg d'azote.

Ce sont les digestats qui contiennent le moins d'ETM par rapport aux autres matières exogènes. Exprimé sur base de la matière sèche, les digestats contiennent, en effet, en comparaison aux autres matières exogènes, des quantités relativement peu importantes en ETM. Ce sont les digestats qui contiennent aussi les teneurs les plus importantes en N par rapport aux autres matières exogènes. Les teneurs en N y sont en effet en moyenne de 6,8 % contre, de manière respective, 0,9, 2,5, 2,0 et 0,6 % pour les boues industrielles, les boues de STEP, les composts et les écumes de sucreries.

Tableau 119. Teneurs en ETM des matières exogènes exprimés par unité d'azote

Matière	Teneur (mg ETM/kg N)							
	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
Boues industrielles	229,0	147,7	1681,4	2641,0	6,6	1437,6	1676,3	18508,2
Boues de STEP	201,6	48,2	1713,6	6667,2	27,2	937,5	2927,5	27737,0
Composts	213,0	40,4	1379,1	2206,4	7,4	729,9	2978,1	12770,7
Ecumes de sucrerie	301,2	91,8	1410,2	3394,2	6,3	596,5	661,0	9339,1
Digestats	21,7	8,9	227,0	646,2	1,0	128,6	221,2	3181,7

4.4.4. Comparaison des différents types de matières fertilisantes

La comparaison des engrais minéraux, des engrais de ferme et des matières exogènes montre que, sur base de la fertilisation azotée, les matières exogènes ont des teneurs généralement largement supérieures pour les huit ETM principalement étudiés. Cela se marque essentiellement pour l'As, le Hg, le Pb et le Zn. Les engrais azotés composés ont néanmoins des teneurs élevées en Cd et Cr. Pour le Ni, les engrais de ferme ont des gammes de teneurs relatives similaires à celles des matières exogènes.

Notons que les digestats ont des teneurs généralement similaires aux engrais de ferme hormis pour le Pb pour lequel les teneurs sont nettement supérieures dans les digestats et pour le Ni où les teneurs sont supérieures dans les engrais de ferme.

Pour une même quantité d'azote apportée, ce sont les engrais minéraux azotés qui apportent le moins d'ETM aux sols agricoles.

5. CONCLUSIONS

Parmi toutes les matières fertilisantes passées en revue dans ce document, ce sont certainement les engrais phosphatés qui sont les matières les plus contaminées en ETM. Ils contiennent en effet des quantités importantes d'ETM par rapport aux engrais de ferme et aux matières exogènes.

Les matières fertilisantes contenant du phosphore ont en effet les teneurs les plus élevées en As, Ba, Cd, Cr, Sr et V par rapport à toutes les autres matières fertilisantes. Les engrais phosphatés comme le superphosphate, l'engrais composé 0-6-12 et l'engrais composé 12-27-0 contiennent des teneurs particulièrement élevées en Co, Cu, Mo, Ni, Pb, Zn.

Notons que l'engrais composé 12-27-0 contient de manière générale de plus grandes quantités d'ETM que les autres engrais minéraux phosphatés. Ces ETM comprennent notamment le Ba, Be, Co, Cr, Ni, Th, U, V et quelques éléments des terres rares.

Le phosphate diammonium contient quant à lui les plus fortes teneurs en Cd.

Le superphosphate contient de loin les teneurs les plus élevées en As et Sr (voir annexe 6 pour l'As et annexe 8 pour le Sr). Le Ba et le V se trouvent à des teneurs particulièrement élevées dans l'engrais composé 12-27-0 et le superphosphate (voir annexe 8 pour le Ba et le V).

Certaines matières minérales comme les engrais azotés et potassiques contiennent relativement moins d'ETM. Parmi les matières azotées, la cyanamide est la plus riche en ETM et au niveau des engrais potassiques, c'est l'haspargit qui est le plus riche.

Les engrais de ferme sont parmi les matières fertilisantes les plus riches en Cu, Mo et Zn et cela, particulièrement pour le lisier de porc et les fientes de volailles. Les fumiers compostés de bovins étant parmi les matières les plus riches en Co.

Le phénanthrène se retrouve en des quantités supérieures à la L.D. dans cinq des huit échantillons d'engrais de ferme analysés. Les fientes de volailles de production d'œufs étant l'engrais de ferme pour lequel le plus de HAP a pu être mesuré.

Les boues de STEP et les composts sont relativement riches en Pb. Les premières étant aussi parmi les matières les plus riches en Cu et Zn (voir annexe 6 pour le Cu et Zn).

Entre toutes les matières fertilisantes détaillées dans ce document, il n'y a que les engrais phosphatés qui dépassent les teneurs en Cd autorisées dans les matières recyclables de classe B2. La teneur moyenne la plus haute est de 22,89 mg Cd/kg M.B. dans le phosphate diammonium pour une valeur limite de 5 mg Cd/kg M.S. dans les matières recyclables (voir annexe 6 pour le Cd).

Aussi, il faut relativiser les teneurs en contaminants dans les différentes matières fertilisantes en considérant que les matières fertilisantes minérales sont plus concentrées en éléments nutritifs N, P et K, ce qui fait que les quantités appliquées par unité de surface sont beaucoup plus faibles que pour les engrais de ferme et les matières exogènes.

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

6.1. Documents

Baize, D., Deslais, W. and Saby, N. (2007). Teneur en huit éléments en traces (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Se, Zn) dans les sols agricoles en France. Résultats d'une collecte de données à l'échelon national. Angers, France, ADEME. Rapport final simplifié (convention 0375 C0035), 86 pp.

da Silva, E.F., Mlayah, A., Gomes, C., Noronha, F., Charef, A., Sequeira, C., Esteves, V. and Figueiredo Marques, A.R. (2010). Heavy elements in the phosphorite from Kalaat Khasba mine (North-western Tunisia) : Potential implications on the environment and human health. J. Hazardous Mater. **182**, 232-245.

Otero, N., Vitoria, L., Soler, A. and Canals, A. (2005). Fertiliser characterisation : Major, trace and rare earth elements. Appl. Geochem. **20**, 1473-1488.

Senesi, N., Polemio, M. and Lorusso, L. (1983). Evaluation of barium, rubidium and strontium contents in commercial fertilizers. Fert. Res. **4**, 135-144.

6.2. Communications personnelles

Galloy, A. (2012). Responsable Cellule Chimie Organique, Direction des Laboratoires d'analyse. ISSeP.

Parmentier, J.M. (2012). Responsable engrais minéraux. Société Rosier (sa).

Marin, J. (2012). Responsable Clientèle. Service d'Analyse des Roches et des Minéraux – CNRS – CRPG.

CHAPITRE 4.
FLUX POTENTIELS DE CONTAMINANTS ETM EN RÉGION WALLONNE ET REPRÉSENTATIONS SPATIALES

1. PRÉAMBULE

Comme nous avons pu le voir dans le chapitre 3, les teneurs en ETM dans les engrais minéraux pour les analyses réalisées par le SARM sont systématiquement supérieures à celles du CARAH ; ceci est dû aux méthodes d'extraction.

Dans cette partie, ce sont les résultats d'analyses réalisées par le CARAH qui ont été utilisés pour l'estimation des flux d'ETM. Le CARAH est en effet un laboratoire faisant partie du réseau Réquasud. Les valeurs obtenues par ce laboratoire permettent de faire des comparaisons cohérentes avec les analyses réalisées sur les autres types de matières fertilisantes (engrais de ferme et matières exogènes) pour lesquelles les analyses ont été faites via des méthodes comparables par les autres laboratoires wallons du réseau Réquasud.

2. INTRODUCTION

L'évaluation des flux en ETM repose sur les calculs préalables des flux d'engrais minéraux et d'engrais de ferme (chapitre 2) et des données fournies par la DPS sur les quantités de matières exogènes épandues sur les sols agricoles wallons.

Le produit de ces flux de matières avec les teneurs moyennes en ETM dans les matières (chapitre 3) permet le calcul des flux d'ETM entrant sur les sols agricoles via les matières fertilisantes.

Cette approche de la contamination conciliant les teneurs en ETM dans les matières avec les quantités de matières utilisées permet de voir quelles sont les matières qui contribuent réellement aux apports en ETM sur les sols agricoles wallons.

Parmi les divers ETM analysés pour les trois types de matières, huit sont présentés dans ce document. Ces huit ETM sont les ETM plus surveillés par l'Europe – As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb et Zn – et correspondent aux ETM dont les analyses étaient disponibles pour les trois types de matières. Cela permet de comparer les différents flux pour chacun de ces huit ETM.

La base de données et les cartes relatives aux autres ETM analysés seront transmises à la Direction de la Protection des Sols (SPW) sous format informatique.

3. MÉTHODES DE CALCUL

Les méthodes de calcul des quantités d'azote, de phosphore (P_2O_5), de potassium (K_2O), le nombre d'unités de valeur neutralisante (U.V.N.) et les quantités d'engrais de ferme épandus sur les sols agricoles ont été détaillées dans le chapitre relatif à l'estimation des flux de matières fertilisantes épandues sur les terres agricoles en Région wallonne (voir chapitre 2). Pour obtenir de plus amples informations sur les données et les calculs réalisés, se référer à l'annexe 3 relative à ce chapitre.

3.1. Engrais minéraux

En ce qui concerne les engrais minéraux, l'estimation des flux en ETM est rendue particulièrement délicate pour les engrais composés. Il n'est en effet pas possible de savoir quelle est la part de la contamination prise par chacun des nutriments de l'engrais composé. Pour contourner cette difficulté, nous avons choisi de déterminer des équations permettant d'estimer la quantité d'ETM à partir des unités d'azote, de phosphore, de potassium et d'U.V.N. apportées par hectare et par an. Ainsi, pour chacun des ETM analysés dans les engrais minéraux, une équation a été déterminée à l'aide du logiciel SAS (version 9.2.). Les coefficients des douze ETM pour lesquels les résultats ont été incorporés au présent rapport sont présentés au Tableau 120 et les coefficients des autres équations sont repris à l'annexe 1.

Ces équations ont été déterminées en fonction des teneurs moyennes en ETM, de la composition centésimale des engrais minéraux et pondérées par les quantités moyennes annuelles vendues par Wal.Agri.

Pour déterminer les teneurs moyennes en ETM dans chacun des engrais minéraux, nous avons, lorsque le cas se présentait, pondéré les moyennes en fonction des parts de marchés de la SCAM et de Wal.Agri. Ainsi, une même matière minérale prélevée à la SCAM et chez Wal.Agri a une teneur moyenne calculée pour laquelle nous avons accordé un poids de 40/65 aux teneurs des échantillons de Wal.Agri et un poids de 25/65 aux teneurs des échantillons de la SCAM.

Tableau 120. Coefficients utilisés dans les équations pour passer des flux de nutriments et d'U.V.N. (exprimés en T/ha/an et U.V.N./ha/an) aux flux des huit ETM (exprimés en g/ha/an).

ETM	Coefficient N	Coefficient P_2O_5	Coefficient K_2O	Coefficient U.V.N.	R^2
As	0,58	15,68	3,62	0,00066	0,25
Cd	0,38	25,07	-0,32	0,0010	0,97
Cr	5,61	147,5	1,32	0,0061	0,46
Cu	0,24	122,6	35,92	0,019	0,15
Hg	0,083	0,28	0,13	0,000044	0,27
Ni	2,20	23,00	1,59	0,0029	0,39
Pb	3,04	32,26	18,92	0,012	0,10
Zn	8,75	380,0	87,91	0,026	0,22

Par exemple, pour la commune de Gembloux, nous avons calculé des apports en N, P_2O_5, K_2O et V.N. de respectivement 145,2, 20,4, 72,0 et 342,8 unités (ou kg pour le N, P_2O_5, K_2O). Les données en N, P_2O_5 et K_2O devant être introduites en tonnes. Cela donne pour l'As :

0,1452*0,58 + 0,0204*15,68 + 0,0720*3,62 + 342,8*0,00066 = **0,89 As g/ha/an.**

3.2. Engrais de ferme

Pour les engrais de ferme, la démarche est moins complexe. Les teneurs moyennes en ETM des différentes catégories d'engrais de ferme ont été multipliées par les quantités épandues (g ETM/T M.S.* T M.S./ha/an).

Il faut noter que, en plus du calcul des quantités d'engrais de ferme produites, comme présenté précédemment dans le chapitre 2, les échanges d'engrais de ferme entre les communes ont été pris en considération dans l'évaluation des flux d'ETM.

Les informations disponibles sur les quantités d'engrais de ferme échangées portent uniquement sur les types d'engrais de ferme (fumier, lisier, fientes, purin, etc.). Nous avons choisi de distribuer ces échanges au sein des catégories d'engrais de ferme fixées en fonction des quantités produites par commune.

3.3. Matières exogènes

Les flux d'ETM entrant sur les sols agricoles wallons via les matières exogènes ont été déterminés en multipliant les teneurs en ETM de chaque matière par les quantités épandues dans chaque commune (g ETM/T MS * T MS/ha/an).

Les teneurs moyennes en ETM des diverses matières exogènes épandues sur les sols agricoles wallons ont été calculées en fonction des résultats d'analyses disponibles qui nous ont été fournis par la DPS.

Dans les cas où aucune valeur de teneur n'était renseignée pour un ETM dans la matière exogène épandue, la valeur qui lui a été attribuée correspond à la moyenne de la matière la plus proche. Par exemple, pour une boue industrielle issue du secteur de la boisson, si aucune teneur en As n'était

renseignée dans le bulletin d'analyses, nous lui avons attribué la teneur moyenne en As du secteur de la boisson.

4. FLUX PAR TYPE DE MATIÈRE

4.1. Proportion des différentes matières dans les flux totaux

La Figure 33 montre les parts des flux imputables aux trois types de matières fertilisantes – engrais minéraux, engrais de ferme et matières exogènes – dans les flux des huit ETM. Ces parts tiennent ainsi compte des teneurs en ETM mais aussi des quantités appliquées par hectare de SAU. Nous pouvons globalement remarquer que, en dépit des teneurs particulièrement élevées en certains ETM dans les engrais minéraux (chapitre 3), les quantités d'engrais de ferme épandues contrebalancent les flux, pour prendre une part relativement importante des flux en ETM.

Ainsi, l'**As**, le **Cd** et le **Cr** se trouvent principalement dans les engrais phosphatés (chapitre 3) mais la part des flux d'**As**, de **Cd** et **Cr** provenant des engrais minéraux ne représente finalement qu'entre 20 et 45 % ; les engrais de ferme et les matières exogènes se partageant le reste des flux.

Les quantités de **Cu**, **Ni** et **Zn** arrivant sur les sols agricoles proviennent principalement des engrais de ferme. C'est en effet dans les engrais de ferme que se trouvent des quantités relativement importantes en ces trois ETM.

Pour le calcul des flux de **Hg**, ce sont les engrais de ferme qui apportent environ 70 % des flux ; les engrais minéraux étant relativement pauvres en Hg par rapport aux engrais de ferme et aux matières exogènes.

Les flux en **Pb** proviennent principalement des engrais minéraux et des matières exogènes. Les engrais de ferme étant très pauvres en Pb par rapport aux deux autres matières.

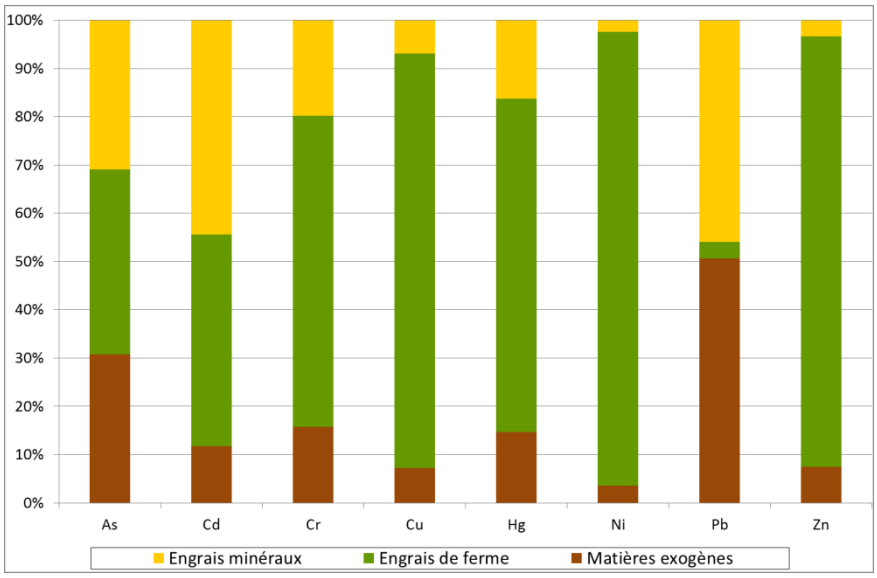

Figure 33. Répartition des flux en différents ETM entre les engrais minéraux, engrais de ferme et matières exogènes.

4.2. Flux issus des engrais minéraux

La Figure 34 montre les flux en ETM arrivant sur les sols agricoles wallons via les engrais minéraux. L'échelle des valeurs varie de 0 à 25 g/ha/an. Nous pouvons voir que les flux les plus élevés sont pour le Zn, Cu, Cr et Pb avec des flux respectifs de 20,98, 10,06, 5,77 et 5,63 g/ha/an. Les flux en Ni, Cd et As étant respectivement de 1,73, 0,89 et 0,76 g/ha/an. Les flux les plus faibles sont pour le Hg avec 0,035 g Hg/ha/an.

L'ordre d'importance des flux correspond globalement à l'ordre d'importance des teneurs dans les engrais minéraux.

Une étude française menée en 2007 sur les contaminants entrant sur les sols agricoles de France (ADEME, 2007) mentionne des flux en ETM d'un ordre de grandeur similaire aux nôtres pour les engrais minéraux. Ainsi, leurs flux moyens calculés pour l'As sont de 1,3 g/ha/an (0,76 g/ha/an dans notre calcul), 1,6 g/ha/an pour le Cd (0,89 g Cd/ha/an dans notre calcul), 22,9 g/ha/an pour le Cr (5,77 g/ha/an dans notre calcul), 5,3 g/ha/an pour le Cu (10,06 g/ha/an dans notre calcul), 3,4 g/ha/an pour le Ni (1,73 g/ha/an dans notre calcul) et 30,1 g/ha/an pour le Zn (20,98 g/ha/an dans notre calcul). Seul le Pb a un ordre de grandeur significativement différent avec 0,6 g/ha/an en moyenne contre 5,63 g/ha/an pour notre calcul sur le territoire wallon.

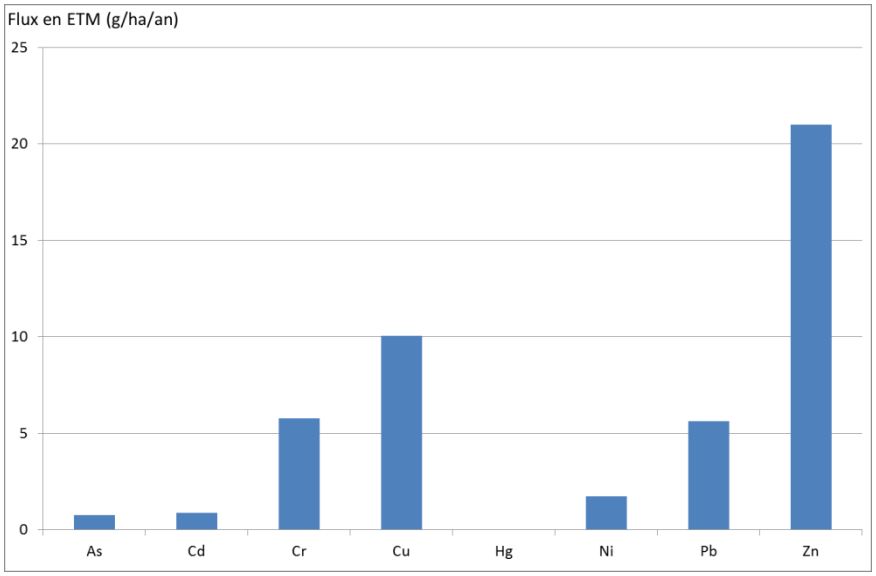

Figure 34. Flux moyens en ETM apportés par les engrais minéraux en Région wallonne.

4.3. Flux issus des engrais de ferme

Avec une échelle de valeur allant de 0 à 600 g/ha/an, la Figure 35 montre les flux en ETM arrivant sur les sols agricoles wallons via les engrais de ferme. Les flux les plus élevés sont pour le Zn, le Cu et le Ni avec des flux respectifs de 554, 125,2 et 68,26 g/ha/an. Les flux respectifs en Cr et Be sont de 18,85 g/ha/an. Finalement, les flux les plus faibles sont pour l'As, le Cd, le Pb et le Hg avec, de manière respective, 0,94, 0,88, 0,42 et 0,15 g/ha/an.

Le fait que le Zn et le Cu se trouvent parmi les plus gros flux est assez logique vu que leurs teneurs dans les engrais de ferme sont relativement importantes (présents de manière volontaire dans l'alimentation).

Les flux mentionnés dans l'étude de l'ADEME pour les engrais de ferme sont tous supérieurs à ceux calculés dans notre étude. Seuls les flux de Ni sont dans un ordre de grandeur similaire au nôtre avec 69,8 g Ni/ha/an (pour 68,26 g Ni/ha/an dans notre cas).

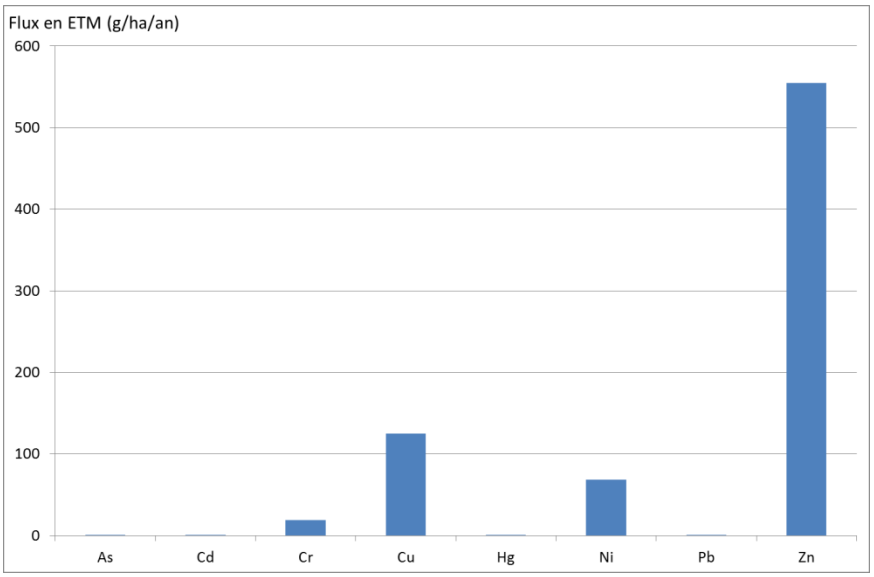

Figure 35. Flux moyens en ETM apportés par les engrais de ferme en Région wallonne.

4.4. Flux issus des matières exogènes

Les flux issus des matières exogènes sont présentés à la Figure 36 avec une échelle de valeur de 0 à 50 g/ha/an. Les plus gros flux d'ETM issus des matières exogènes sont ceux du Zn et du Cu avec, dans l'ordre, 46,31 et 10,48 g/ha/an. Les flux de Pb, Cr et Ni sont de 6,22, 4,61 et 2,60 g/ha/an. Les plus petits flux sont ceux de l'As, du Cd et du Hg avec 0,75, 0,24 et 0,031 g/ha/an.

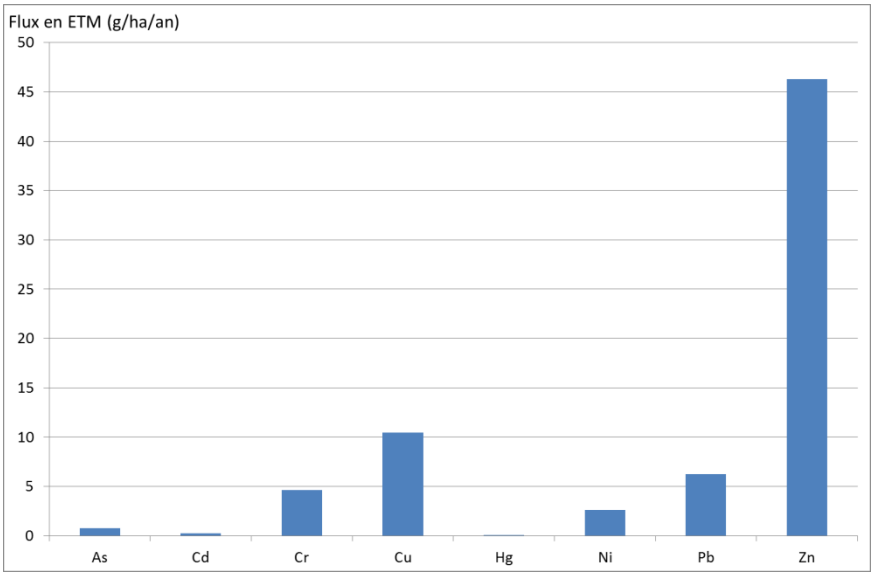

Figure 36. Flux moyens en ETM apportés par les matières exogènes en Région wallonne.

4.5. Comparaison par rapport aux normes existantes et à la teneur du sol

Le Tableau 121 montre qu'aucun flux, même maximal, parmi les huit ETM considérés ne dépasse les normes de flux autorisées pour les matières recyclables ; les flux en ETM arrivant sur les sols se trouvant largement en deçà des normes de la Directive européenne.

Tableau 121. Flux moyens et maxima en ETM arrivant sur les sols agricoles en Région wallonne via les différents types de matières fertilisantes.

ETM	Flux en ETM arrivant sur les sols agricoles en Région wallonne (g/ha/an)						
	Engrais minéraux		Engrais de ferme		Matières exogènes		Maximum Directive 86/278/CEE
	Moyenne	Maximum	Moyenne	Maximum	Moyenne	Maximum	
As	0,76	1,11	0,94	2,21	0,75	5,49	
Cd	0,89	1,19	0,88	1,88	0,24	1,06	150
Cr	5,77	7,76	18,85	40,43	4,61	25,88	
Cu	10,06	13,32	125,2	268,7	10,48	80,33	12000
Hg	0,035	0,047	0,15	0,31	0,031	0,27	100
Ni	1,73	2,19	68,26	123,4	2,60	14,44	3000
Pb	5,63	7,23	0,42	0,99	6,22	74,68	15000
Zn	20,98	29,56	554,3	1177	46,31	349,6	30000

Par rapport aux données disponibles sur les teneurs en ETM dans les sols agricoles wallons, les flux relatifs[13] varient d'un ETM à l'autre et d'une commune à l'autre. Les flux relatifs les plus faibles varient de 0,0005 % à 0,095 %, tandis que les plus élevés varient de 0,06 à 1,54 %. La valeur maximale de 1,54 % correspond au Cd pour la commune de Martelange pour laquelle la teneur moyenne du sol en Cd est de 0,03 mg/kg M.S. et pour laquelle le flux total en Cd arrivant sur les sols agricoles est de 1,93 g/ha/an. Notons qu'en moyenne, les flux relatifs varient de 0,013 à 0,264 %.

5. FLUX D'ETM ARRIVANT SUR LES SOLS AGRICOLES EN RÉGION WALLONNE

La représentation spatiale des flux en ETM a été faite par classe de valeurs ne prenant en considération aucune norme ou autre critère. Certaines communes se trouvent ainsi classées en zones plus foncées ou plus claires alors que les flux ne sont pas significativement différents d'une autre commune se trouvant dans la classe adjacente.

5.1. Arsenic

Les flux d'As arrivant sur les communes wallonnes sont particulièrement concentrés dans la zone polyculture/élevage de la Wallonie (Figure 37). Cela peut s'expliquer par une utilisation plus intensive d'engrais minéraux (phosphatés particulièrement ; voir chapitre 2), plus fortement chargés en As que les engrais de ferme (voir chapitre 3).

[13] Les flux relatifs représentent les quantités d'ETM arrivant sur les sols agricoles wallons par rapport aux quantités contenues par les sols. Ils ont été calculés en utilisant les données issues de CAPASOL renseignant les teneurs des sols de 234 communes wallonnes en sept ETM (Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb et Zn). Les données étant exprimées en mg/kg M.S. de sol, les quantités contenues par les sols ont été calculées en considérant une profondeur de 30 cm et une densité de 1,4. Etant donné que les flux en ETM ont été calculés à l'échelle de la commune, nous avons utilisé les teneurs moyennes par commune pour déterminer les flux relatifs minima et maxima.

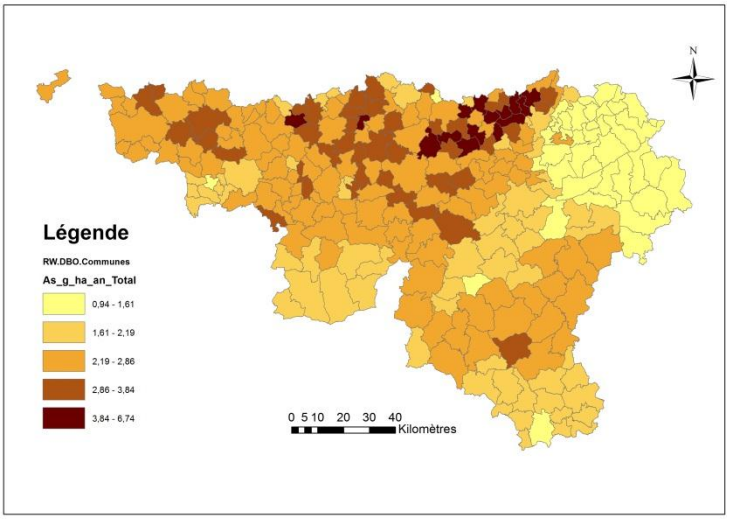

Figure 37. Flux totaux d'As arrivant sur les sols agricoles wallons.

5.2. Cadmium

Les flux de Cd se concentrent en Ardenne, cette région présente les flux d'engrais phosphatés (P_2O_5) et d'engrais de ferme parmi les plus élevés de la Wallonie. Notons aussi des flux relativement importants en Région herbagère où les flux d'engrais de ferme sont élevés aussi. Cette répartition des flux de Cd suit donc très certainement à la fois les flux de P_2O_5 (riches en Cd) et les flux en engrais de ferme (moins riches en Cd mais plus importants en flux de matière).

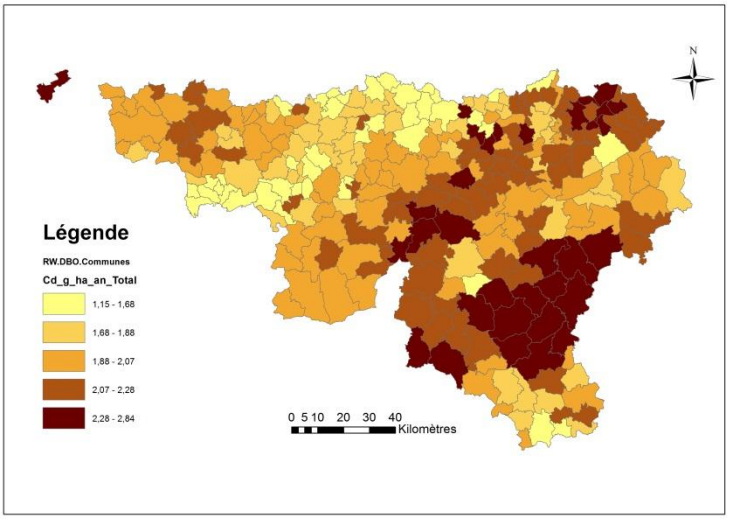

Figure 38. Flux totaux de Cd arrivant sur les sols agricoles wallons.

5.3. Chrome

Le Cr suit *grosso modo* une répartition spatiale similaire du Cd. En effet, dans le classement des engrais minéraux et des engrais de ferme en fonction de leur contamination, le Cr suit le même ordre que le Cd.

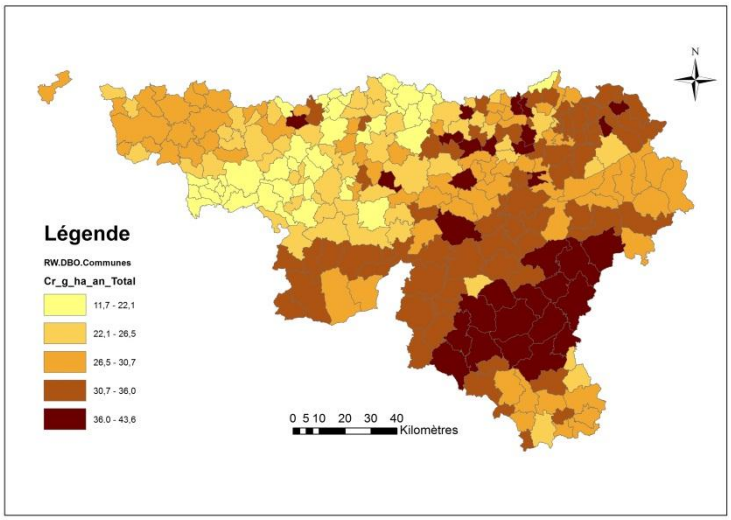

Figure 39. Flux totaux de Cr arrivant sur les sols agricoles wallons.

5.4. Cuivre

Les flux en Cu se trouvent renforcés dans les zones où se trouvent préférentiellement des élevages de porcs et de volailles. Une zone de flux importants se trouvant à l'ouest de la Wallonie, aux environs de Comines-Warneton et une autre zone importante se trouvant à l'est de la Wallonie, du côté du pays de Herve.

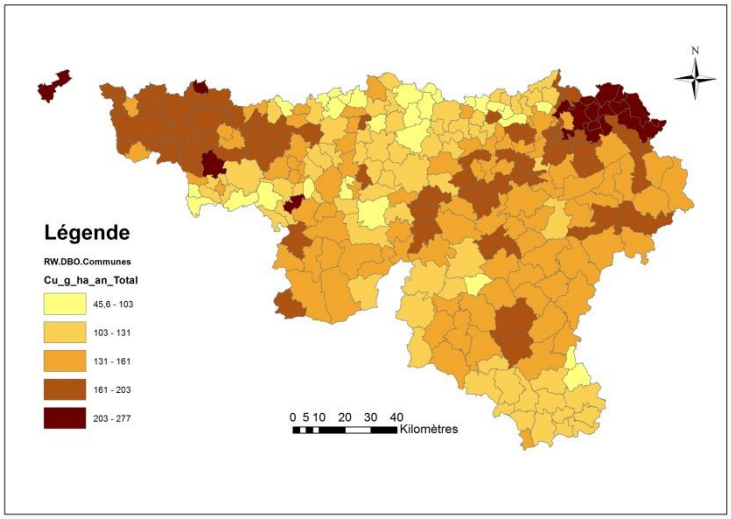

Figure 40. Flux totaux de Cu arrivant sur les sols agricoles wallons.

5.5. Mercure

Les flux en Hg semblent se concentrer en Ardenne. Les flux semblent suivre, comme pour le Ba, les flux d'engrais de ferme.

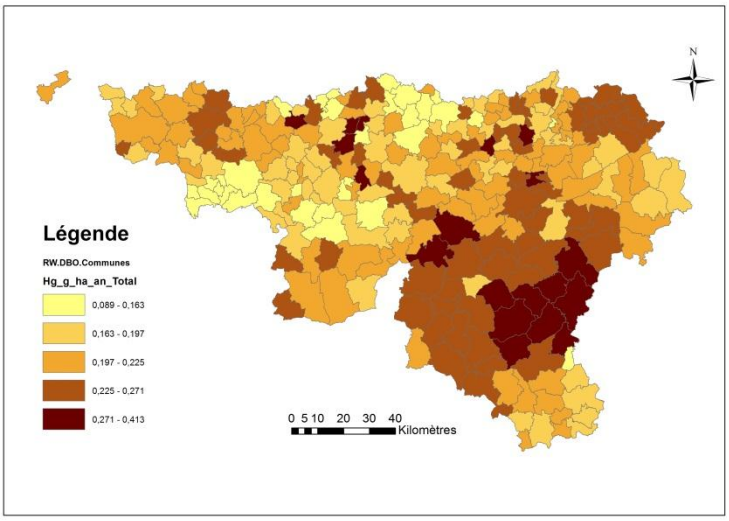

Figure 41. Flux totaux de Hg arrivant sur les sols agricoles wallons.

5.6. Nickel

Les flux de Ni s'alignent sur les flux d'engrais de ferme. Le Ni se trouve en effet à des teneurs intermédiaires dans les engrais de ferme qui sont compensées par des flux de matières sèches plus élevés que les engrais minéraux.

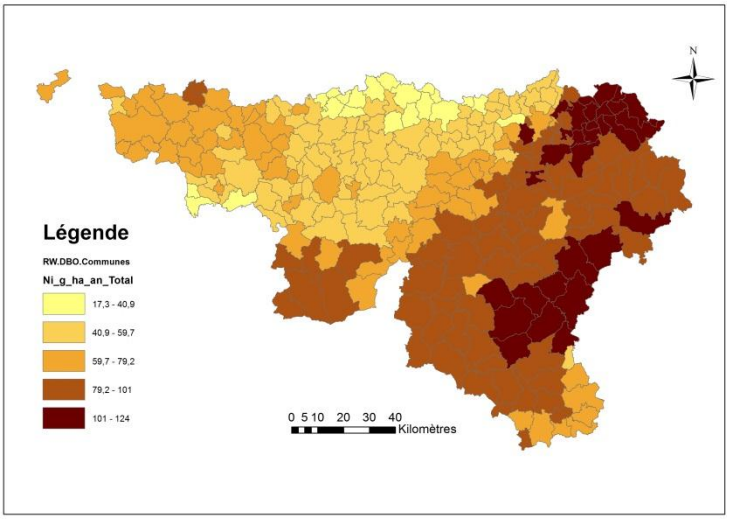

Figure 42. Flux totaux de Ni arrivant sur les sols agricoles wallons.

5.7. Plomb

Les flux en Pb semblent suivre préférentiellement les flux en potassium (voir chapitre 2). Avec les matières exogènes, les engrais potassiques sont en effet relativement bien chargés en Pb.

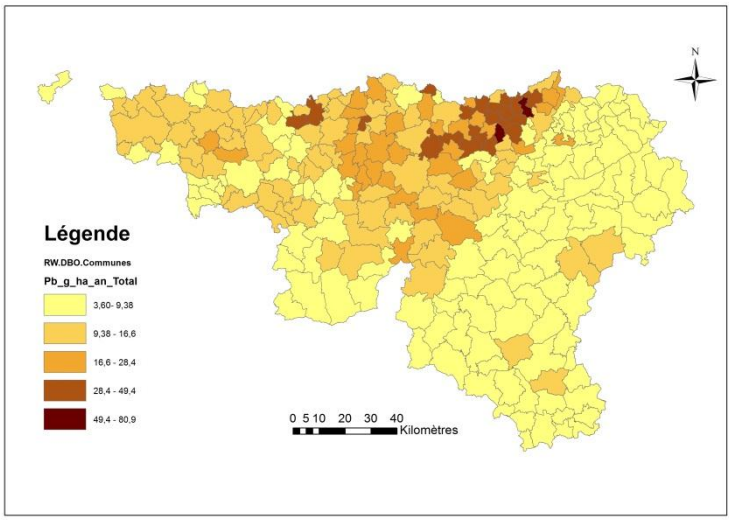

Figure 43. Flux totaux de Pb arrivant sur les sols agricoles wallons.

5.8. Zinc

Encore une fois, le Zn suit la répartition spatiale des engrais de ferme. Comme pour le Cu, une zone de flux importants se trouve à l'ouest de la Wallonie, aux environs de Comines-Warneton et une autre se trouve à l'est de la Wallonie, du côté du pays de Herve. Les engrais de ferme étant particulièrement concentrés en Zn (surtout les lisiers de porcs).

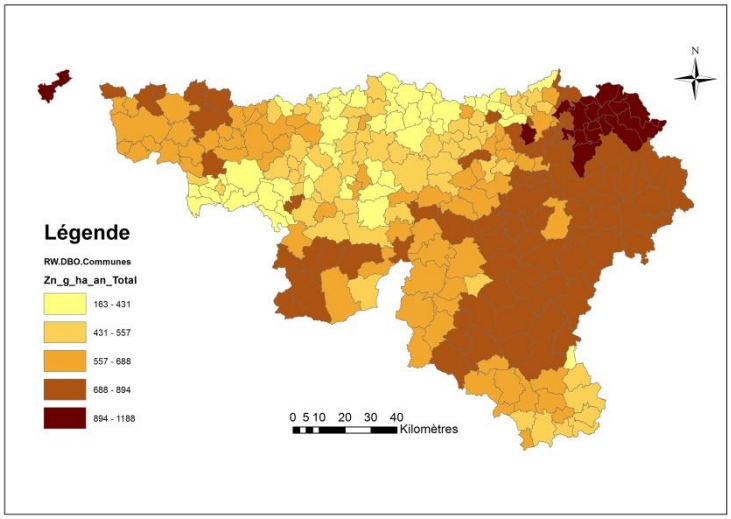

Figure 44. Flux totaux de Zn arrivant sur les sols agricoles wallons.

6. CONCLUSIONS

Pour tous les ETM passés en revue dans ce document, les engrais de ferme représentent généralement la première source de contamination. C'est le cas pour l'As, le Cr, le Cu, le Hg, le Ni et le Zn. Les engrais minéraux occupent néanmoins une place importante des flux en As, Cd, Pb. Les matières exogènes ne représentent généralement qu'une petite partie des flux en ETM arrivant sur les sols agricoles wallons car les quantités épandues sont relativement faibles. Les seuls flux où les matières exogènes participent à plus de 50 % des flux concernent le Pb.

La répartition des flux en ETM sur le territoire wallon est fortement influencée par les engrais de ferme. Les flux de ces matières arrivant sur les sols agricoles compensent en effet largement leurs teneurs souvent plus faibles en ETM par rapport aux engrais minéraux. Les engrais de ferme peuvent ainsi être facilement classés parmi les matières apportant les quantités les plus importantes d'ETM sur les sols agricoles wallons. Il faut cependant mentionner que les ETM contenus et transportés via ces matières s'inscrivent en partie dans un cycle fermé. En effet, les ETM pris aux sols lors de la production d'aliments fourragers ou lors du pâturage retournent directement au sol par les productions d'engrais de ferme et par les restitutions au pâturage suite à l'ingestion de ces aliments. Ce qui apporte réellement des ETM dans les sols, ce sont les quantités d'engrais de ferme produits après l'ingestion d'aliments qui ne proviennent pas des sols sur lesquels sont épandues les matières. Il serait d'ailleurs très intéressant, d'une part, d'évaluer les flux des ETM « exogènes » qui proviennent d'aliments produits à l'extérieur de l'exploitation et, d'autre part, de prendre en compte les flux d'ETM exportés par les récoltes.

Aussi important que peuvent paraître les « spots » de flux en ETM sur le territoire wallon, il apparaît qu'aucun d'entre eux ne dépasse les normes de flux imposées par l'Europe en matière de valorisation agricole des matières exogènes à l'agriculture ; ils sont même largement en dessous. Au niveau des cartes présentées dans ce chapitre, les communes classées parmi les couleurs les plus sombres ne présentent donc pas des flux considérés comme dangereux mais ces communes ont simplement des flux qui sont compris dans la classe la plus élevée.

Par rapport aux teneurs en ETM contenues dans les sols, les flux sont en moyenne très faibles (< 1 %) et provoquent au maximum une augmentation annuelle de 1,54 % en Wallonie (Cd pour la commune de Martelange).

Les « spots » de flux potentiels les plus importants pourraient néanmoins faire l'objet d'une attention particulière afin de mieux estimer les flux de manière locale et favoriser, si nécessaire, une diminution des flux identifiés. Ceci contribuerait à améliorer les connaissances relatives aux teneurs en ETM dans les sols wallons.

7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ADEME (2007). Bilan des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles de France Métropolitaine. Bilan qualitatif de la contamination par les éléments tracés métalliques et les composés tracés organiques et application quantitative pour les éléments tracés métalliques. Angers, France, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). Rapport final. 329 pp.

CHAPITRE 5.
PLAN DE SURVEILLANCE DES RISQUES DE CONTAMINATION DES SOLS PAR LES ETM ET LES CTO PRÉSENTS DANS LES MATIÈRES FERTILISANTES

– Chapitre 5. Plan de surveillance des risques de contamination des sols par les ETM et les CTO présents dans les matières fertilisantes –

1. PRÉAMBULE

Le projet CONTASOL prévoit d'estimer les quantités de contaminants entrant sur les sols agricoles wallons par l'intermédiaire des matières fertilisantes. Les types de matières fertilisantes prises en considération dans cette étude comprennent les engrais minéraux, les engrais de ferme et les matières exogènes que sont les boues de stations d'épuration urbaines, les boues industrielles, les écumes de sucreries et les composts.

Il faut cependant bien noter que ces trois types de matières fertilisantes ne sont pas équivalents en termes de flux potentiels de contamination. En effet, alors que les engrais minéraux et les matières exogènes à l'agriculture apportent des quantités de matières qui proviennent de l'extérieur du système agricole, les engrais de ferme représentent une partie intégrante de l'activité agricole et ne font que recycler les matières au sein du système. Il est clair qu'à l'origine, les engrais de ferme ne faisaient que restituer aux sols ce qui avait été prélevé par les végétaux ayant servi à nourrir les animaux. Cependant, avec l'évolution des pratiques agricoles, l'import d'aliments en provenance de divers pays du monde et l'ajout de compléments alimentaires (additifs et médicaments) a occasionné un apport complémentaire d'éléments fertilisants ainsi que d'éléments contaminants sur les sols agricoles wallons. Comme souligné par la suite dans ce document, une étude approfondie des parts de contaminants « endogènes » et « exogènes » au système agricole wallon serait intéressante à réaliser.

2. INTRODUCTION

La surveillance des matières fertilisantes doit être considérée comme une partie intégrante de la surveillance de la qualité des sols agricoles. L'objectif de cette partie de l'étude sur la contamination des sols par les ETM et les CTO contenus dans les matières fertilisantes est de définir les principes d'une démarche de surveillance en adéquation avec la volonté de la DPS de limiter les risques de contamination des sols agricoles tout en satisfaisant l'exigence de durabilité de l'agriculture.

Si les chapitres précédents ont permis d'estimer l'importance des flux de matières fertilisantes et de contaminants, ils n'ont toujours fait clairement apparaître les situations présentant un risque potentiellement plus élevé pour l'utilisation durable des sols agricoles wallons. Bien au contraire, nous avons par exemple pu voir dans le chapitre précédent que les flux entrant pour les ETM actuellement règlementés sont largement inférieurs aux limites fixées par l'Europe en termes de valorisation des boues d'épuration.

Dans ce document, nous allons donc passer en revue les matières et les contaminants identifiés au cours du projet en les combinant à des paramètres caractérisant l'état du milieu ou des sols. Ceci nous permettra d'identifier plus précisément les risques potentiels plus élevés des différentes matières et contaminants.

L'identification des risques potentiels permettra de recommander le suivi de certaines matières et contaminants. En outre, la démarche de surveillance tiendra compte de l'amélioration des informations ayant été utilisées au cours de ce projet afin de renforcer la qualité des estimations qui ont été produites, de détecter une possible évolution des flux au cours du temps et de mieux les relativiser.

Il est clair que les apports exessifs en ETM sont toxiques pour les organismes vivants. Cependant, il faut bien garder à l'esprit que parmi les ETM apportés en plus grandes quantités sur les sols agricoles wallons, certains sont aussi des oligo-éléments essentiels à la vie. C'est le cas du Cu et du Zn. D'autres ETM, comme le Cd, n'ont par contre pas de fonction biologique avérée et sont considérés comme très toxiques. Toute la question est de savoir quels sont les flux maximaux acceptables pour écarter les risques de danger.

3. ANALYSE DES RISQUES RELATIFS

3.1. Classement des matières à risque

Au sein des trois types de matières fertilisantes prises en considération dans le projet, nous avons estimé l'importance de chaque matière dans la contamination des sols agricoles wallons. Pour les engrais minéraux, les engrais de ferme et les matières exogènes, nous avons réalisé un classement des matières selon leurs teneurs en ETM[14] pondérées par les quantités potentielles de matières actuellement épandues.

Pour les engrais minéraux, les quantités commercialisées par Wal.Agri sur la période 2006-2010 sont supposées être représentatives des proportions d'engrais minéraux épandues (chapitre 2) ; pour les engrais de ferme, nous nous sommes basés sur les quantités produites et les échanges entre communes (chapitre 2) ; pour les matières exogènes, nous avons utilisé les données transmises par la DPS (chapitre 4).

Pour chaque combinaison matière/ETM, on a calculé le produit de la quantité de matière potentiellement épandue par la teneur moyenne en ETM afin de déterminer les flux de chaque ETM par matière. On a ensuite calculé la moyenne de ces flux par ETM. Les flux matière ont finalement été comparés aux moyennes correspondantes. Pour chaque matière, les flux supérieurs à la moyenne ont reçu un score de 1. Les flux inférieurs à la moyenne ont reçu un score de 0.

Afin de donner des indices de hiérarchisations supplémentaires, nous avons également déterminé le nombre de fois où la matière était classée en première position par rapport au flux d'ETM.

3.1.1. Engrais minéraux

Nous pouvons voir, au Tableau 122, que quatre engrais minéraux sont classés parmi les matières apportant le plus d'ETM sur les sols agricoles wallons. Ce sont le phosphate naturel semi-attaqué et les engrais composés 12-27-0 et 18-6-5 et le phosphate diammonium. Les apports via ces matières sont supérieurs à la moyenne pour plus de 30 ETM analysés. De plus, le phosphate naturel semi-attaqué, l'engrais composé 12-27-0 et le phosphate diammonium sont régulièrement classés en première position.

Parmi les engrais minéraux se trouvant en classe « intermédiaire » (environ 20 ETM supérieurs à la moyenne), on trouve l'engrais composé 0-6-12 (poudre), le nitrate d'ammonium, le nitrate d'ammonium (4 % MgO), l'engrais composé 0-11-11 et la dolomie. L'engrais composé 0-6-12 (poudre), le nitrate d'ammonium et le nitrate d'ammonium (4 % MgO) sont régulièrement classés en première position.

Les engrais minéraux pour lesquels au maximum 5 ETM sont apportés en quantités supérieures à la moyenne sont le chlorure de potassium (60 %), la kaïnite, l'engrais composé 5-10-30, le triple superphosphate, le carbonate de calcium, le chlorure de potassium (40 %) et la solution azotée. Aucun d'entre eux n'est classé en première position pour un ETM donné.

Les autres engrais minéraux renseignés dans le bas du Tableau 122 ont des flux qui sont tous inférieurs à la moyenne pour tous les ETM analysés et ne sont jamais classés en première position. Ce sont donc les engrais minéraux apportant le moins d'ETM sur les sols agricoles wallons. Les teneurs en ETM dans ces engrais sont en effet relativement faibles mais ce sont parfois les quantités employées (cas du superphosphate) qui limitent les apports en ETM.

[14] Les teneurs sous la limite de détermination sont supposées être égales à la moitié de cette limite. Pour les engrais minéraux, ce sont les données d'analyse du SARM qui ont été utilisées ; les données du CARAH ont été utilisées pour déterminer les scores du Hg et du Se uniquement. Pour les ETM dosés en commun par le SARM et le CARAH, l'ordre d'importance de classement des matières minérales est comparable.

A l'inverse, certains engrais minéraux dont les teneurs en ETM sont relativement basses, parfois inférieures à la limite de détermination, se trouvent classés parmi les matières apportant des quantités intermédiaires d'ETM sur les sols agricoles wallons. C'est le cas du nitrate d'ammonium et du nitrate d'ammonium (4 % MgO) pour lesquels les quantités épandues sont relativement importantes.

Tableau 122. Classement des engrais minéraux en fonction de leurs teneurs en ETM et des quantités commercialisées au niveau de la Région wallonne.

Matière	Nombre ETM supérieurs à la moyenne	Nombre de fois 1er au classement
Phosphate naturel semi-attaqué	37	7
Composé 12-27-0	36	8
Composé 18-6-5	36	0
Phosphate diammonium	32	12
Composé 0-6-12 (poudre)	25	12
Nitrate d'ammonium	22	6
Nitrate d'ammonium (4 % MgO)	21	3
Composé 0-11-11	20	0
Dolomie	17	0
Chlorure de potassium (60 %)	5	0
Kaïnite	4	0
Composé 5-10-30	4	0
Triple superphosphate	4	0
Carbonate de calcium	3	0
Chlorure de potassium (40 %)	1	0
Solution azotée	1	0
Cyanamide calcique	0	0
Haspargit	0	0
Maerl	0	0
Composé 0-7-30	0	0
Sulfate d'ammonium	0	0
Sulfate de potassium	0	0
Superphosphate	0	0
Urée	0	0

Au niveau de la Région wallonne, les engrais minéraux présentant les plus grands risques par rapport aux apports d'ETM sur les sols agricoles sont donc le **phosphate naturel semi-attaqué**, les engrais **composés 12-27-0**, **18-6-5** et **0-6-12**, le **phosphate diammonium** et **0-6-12 (poudre)**.

3.1.2. Engrais de ferme

Le Tableau 123 montre le classement des engrais de ferme en fonction des quantités épandues au niveau de la Région wallonne et des teneurs en ETM. Etant donné que les teneurs en ETM dans les engrais de ferme sont *grosso modo* similaires entre les différentes catégories, le classement des matières suit les quantités d'engrais de ferme les plus épandues en Région wallonne.

Nous pouvons voir que, compte tenu des paramètres calculés, les trois engrais de ferme apportant le plus d'ETM par rapport aux autres sont le lisier et le fumier de bovin viande en zone herbagère et le lisier de bovin lait en zone herbagère.

Les catégories d'engrais de ferme se trouvant dans la classe intermédiaire sont les mêmes que les trois catégories d'engrais de ferme de la classe supérieure mais correspondent à la zone polyculture/élevage. Il faut noter que le lisier de bovin viande en zone polyculture/élevage n'a pas été analysé. Pour déterminer les teneurs en ETM dans cette catégorie de lisier, on a calculé la moyenne des teneurs dans les trois autres catégories de lisier.

Les catégories d'engrais de ferme apportant les quantités les plus faibles sont le lisier de porc à l'engraissement, les fumiers de bovin lait et les fientes de volailles. Le seul ETM pour lequel le lisier de porc à l'engraissement à un score supérieur à la moyenne est le Cu. Les teneurs en Cu dans le lisier de porc à l'engraissement sont en effet relativement supérieures aux autres catégories d'engrais de ferme. Les teneurs en Zn relativement plus élevées dans les lisiers de porc et les fientes de volailles ne sont pas visibles globalement au niveau de la Région wallonne vu les faibles quantités épandues.

Tableau 123. Classement des engrais de ferme en fonction de leurs teneurs en ETM et des quantités épandues au niveau de la Région wallonne.

Matière	Nombre ETM supérieurs à la moyenne	Nombre de fois 1er au classement
Lisier de bovin viande en zone herbagère	14	6
Fumier de bovin viande en zone herbagère	14	1
Lisier de bovin lait en zone herbagère	13	6
Lisier de bovin viande en zone polyculture/élevage	13	0
Fumier de bovin viande en zone polyculture/élevage	10	0
Lisier de bovin lait en zone polyculture/élevage	9	1
Lisier de porc à l'engraissement	1	0
Fientes de volailles (chair)	0	0
Fumier de bovin lait en zone polyculture/élevage	0	0
Fumier de bovin lait en zone herbagère	0	0
Fientes de volailles (production d'œufs)	0	0

☞ Au niveau de la Région wallonne, les engrais de ferme présentant les plus grands risques par rapport aux apports d'ETM sur les sols agricoles sont donc le **lisier** et le **fumier de bovin viande en zone herbagère** et le **lisier de bovin lait en zone herbagère**.

3.1.3. Matières exogènes

On peut voir, au Tableau 124, le classement des matières exogènes en fonction des paramètres calculés à partir des teneurs en ETM et des quantités épandues. Les composts et les écumes de sucrerie, de par les quantités épandues relativement importantes, sont classés en tête. Les écumes de sucrerie est la catégorie de matière exogène dont les teneurs en ETM sont paradoxalement les plus basses.

Tableau 124. Classement des matières exogènes en fonction de leurs teneurs en ETM et des quantités épandues au niveau de la Région wallonne.

Matière	Nombre ETM supérieurs à la moyenne	Nombre de fois 1er au classement
Composts	6	2
Ecumes de sucrerie	4	4
Boues de STEP	3	2
Boues industrielles	2	0

☞ Au niveau de la Région wallonne, les matières exogènes présentant les plus grands risques par rapport aux apports d'ETM sur les sols agricoles sont donc les **composts** et les **écumes de sucrerie**.

Le Tableau 125 montre le classement des matières exogènes réalisé de la même manière que pour le Tableau 124 mais avec les teneurs en CTO. Les matières sont difficilement classables au vu des deux paramètres calculés. Les composts sont néanmoins classés en première position pour les deux paramètres calculés.

Tableau 125. Classement des matières exogènes en fonction de leurs teneurs en CTO et des quantités épandues au niveau de la Région wallonne

Matière	Nombre CTO supérieurs à la moyenne	Nombre de fois 1er au classement
Composts	3	3
Boues de STEP	3	0
Boues industrielles	2	1
Ecumes de sucrerie	2	2

3.2. Analyse des contaminants

Le choix des contaminants à mesurer ne doit considérer que les substances qui peuvent atteindre des limites critiques par rapport à la santé humaine, la sécurité alimentaire, la fertilité des sols, les risques écologiques en particulier concernant la biodiversité dans le sol, les eaux souterraines et de surface. Pour évaluer le degré de sensibilité des paramètres qui doivent être mesurés, il est donc nécessaire de prendre en compte le volume des flux entrants, l'importance relative de ces flux par rapport aux concentrations présentes dans le milieu, la sensibilité des sols et la toxicité des contaminants. Cette toxicité étant un paramètre délicat à appréhender tant elle dépend des concentrations et des organismes considérés que des formes sous lesquelles peuvent se trouver les ETM ou les CTO.

La liste d'ETM proposée par les recommandations européennes (Van-Camp, 2004) en matière de surveillance de la qualité des sols sont l'As, le Cd, le Cr, le Cu, le Hg, le Ni, le Pb et le Zn.

Parmi ces huit ETM, le Cd, le Hg et le Pb sont particulièrement importants au vu de leur toxicité, de leur potentiel à être nocif à des concentrations faibles et à s'accumuler dans les tissus biologiques (Van-Camp, 2004).

En ce qui concerne les CTO, l'UE recommande de suivre les HAP, les composés dioxiniques et les autres PCB (Van-Camp, 2004).

On a pu voir dans, le chapitre 4 relatif aux flux potentiels de contaminants ETM en Région wallonne, que les flux entrants en Cd, Cu, Hg, Ni, Pb et Zn sont largement inférieurs aux normes fixées par l'Europe pour la valorisation des boues d'épuration en agriculture (Anonyme, 1986).

Dans le but d'identifier les ETM à surveiller préférentiellement, nous avons relativisé les flux entrants en ETM par rapport aux teneurs moyennes des sols wallons. Pour ce faire, on a utilisé les données du projet CAPASOL en fonction des valeurs de référence disponibles et les teneurs en ETM de la croûte terrestre (Lide, 2005).

3.2.1. ETM

a. Comparaison de flux entrants avec les teneurs des sols wallons

Dans le but d'avoir une représentation plus parlante de l'évolution des teneurs des sols à long terme, on a extrapolé les flux en ETM entrants sur une période de 100 ans. Pour chaque ETM, les quantités moyennes par hectare de sol agricole wallon ont été déterminées à partir des teneurs moyennes du projet CAPASOL, exprimées en mg/kg de sol sec, en considérant une épaisseur de sol de 30 cm et une densité de 1,4.

Pour un ETM donné, le rapport du flux séculaire total en ETM entrants sur la teneur moyenne du sol donne le « flux relatif séculaire total » (ou FRST). Ce FRST représente la somme des FRS (« flux relatif séculaire ») moyens des trois types de matières prises en considération dans le projet, à savoir les engrais minéraux, les engrais de ferme et les matières exogènes.

En moyenne, sur tout le territoire de la Région wallonne, les FRST varient de 1,4 à 25,9 % selon l'ETM (Tableau 126). Les engrais minéraux et les engrais de ferme participent généralement majoritairement aux FRST.

On peut voir que les FRST moyens wallons les plus importants correspondent au Cd, Cu et Zn avec des FRST respectifs de 10,9, 25,9 et 19,3 %. Pour ces trois ETM, nous avons les trois FRST maximaux les plus élevés par rapports aux autres ETM du Tableau 126. Nous pouvons voir aussi que le FRST maximal du Ni peut atteindre 28,8 %. Pour chacun de ces quatre ETM, on peut voir que les engrais de ferme contribuent fortement aux FRST. Notons cependant que, pour le Cd, le FRS des engrais minéraux contribue à la majeure partie du FRST moyen.

Tableau 126. Tableau récapitulatif des flux relatifs séculaires moyens des trois types de matières fertilisantes prises en compte dans le travail. Pour les engrais minéraux, les valeurs calculées se basent sur les résultats d'analyses du SARM.

ETM	Quantité moyenne présente dans les sols wallons (kg/ha)	FRS moyens wallons (%)			FRST moyen wallon (%)	FRST maximal wallon (%)
		Engrais minéraux	Engrais de ferme	Matières exogènes		
Cd	**1,92**	5,1	4,6	1,3	10,9	161,6
Cr	**144**	1,0	1,3	0,3	2,6	8,3
Cu	**57,7**	2,4	21,7	1,9	25,9	94,8
Hg	**0,536**	0,6*	2,7	0,6	3,9	13,5
Ni	**95,7**	0,4	7,1	0,3	7,9	28,8
Pb	**125**	0,9	0,03	0,5	1,4	7,0
Zn	**341**	1,6	16	1,4	19,3	45,2

* la valeur été calculée sur base des analyses du CARAH – le SARM n'analysant pas cet élément.

A partir des flux en ETM entrants extrapolés sur un siècle et des teneurs moyennes en ETM des sols wallons, nous avons pu estimer les quantités, pour chaque commune, qui seront présentes dans les sols wallons après 100 années de fertilisation à pratiques constantes (hypothèse). Pour ce faire,

nous avons additionné les teneurs du sol et les flux en ETM entrants sur un siècle. La Figure 45 montre les comparaisons des teneurs probables ainsi obtenues avec les valeurs de références[15] (VR), les valeurs seuils[16] (VS) et les valeurs d'interventions[17] (VI) renseignées dans le décret relatif à la gestion des sols du 5 décembre 2008.

Les ETM pour lesquels le plus grand nombre de communes dépasse la VR sont le Cd, le Cu, le Hg et le Zn ; pour le Cr, le Ni et le Pb, les effectifs des communes sont globalement centrés sur la VR. Le Cd et le Zn sont des ETM à prendre particulièrement en considération car la répartition des effectifs des communes aura tendance à se déplacer vers la VS voire à la dépasser. Pour le Zn, certaines communes se trouveront au-delà de la VI.

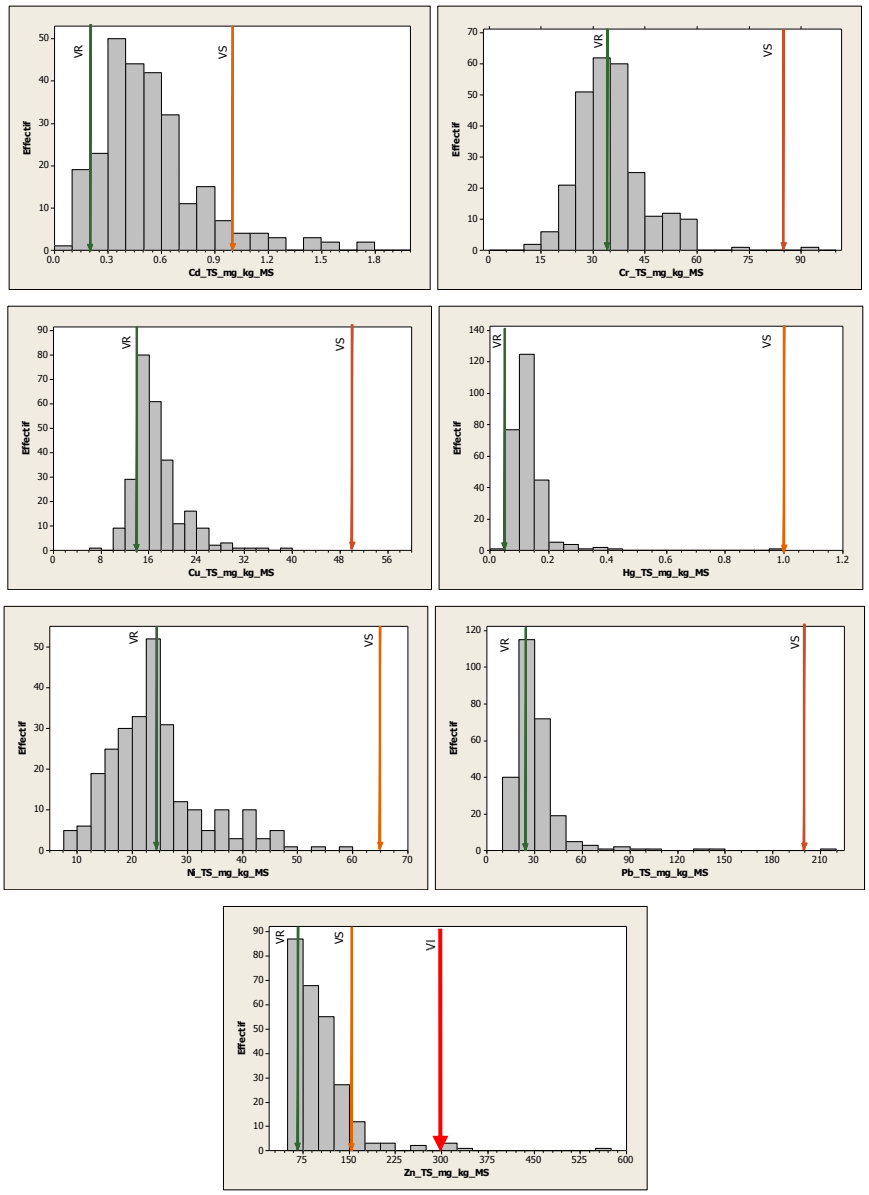

Figure 45. Comparaison des teneurs des sols après 100 années de fertilisation avec la VR, la VS et la VI.

[15] La VR est indicatrice des concentrations de fond en contaminants dans le sol en l'absence de variations géologiques naturelles, d'influence d'une activité agricole, industrielle ou urbaine généralisée. Elle correspond à l'objectif d'assainissement.

[16] La VS est la teneur en contaminants correspondant à un niveau au-delà duquel une étude de caractérisation doit être entreprise, ainsi qu'en cas de menace grave ou de pollution nouvelle, un assainissement et, le cas échéant, des mesures de sécurité ou des mesures de suivi.

[17] La VI est la teneur du sol à partir de laquelle une intervention est systématiquement entreprise (assainissement, mesures de sécurité et/ou mesures de suivi).

Les observations faites au Tableau 126 et à la Figure 45 montrent l'importance particulière des flux de Cd et de Zn dans la contamination des sols agricoles wallons par l'intermédiaire des matières fertilisantes.

b. Comparaison avec les teneurs de la croûte terrestre

Les données sur les teneurs en ETM des sols wallons issues du projet CAPASOL étant limitées à sept ETM, nous avons utilisé les teneurs de la croûte terrestre afin de voir dans quels ordres de grandeurs se trouvent les flux entrants des autres ETM. Comme le montre le Tableau 127, les teneurs moyennes des sols wallons et de la croûte terrestre se trouvent dans un ordre de grandeur similaire. Le plus grand écart relatif est pour le Cu, avec 60 mg Cu/kg de roche contre 13,7 mg Cu/kg de sol.

Tableau 127. Comparaison des teneurs moyennes en ETM dans la croûte terrestre et les sols agricoles wallons.

ETM	Teneur moyenne de la croûte terrestre (mg/kg)	Teneur moyenne des sols wallons (mg/kg M.S.)
Cd	0,150	0,456
Cr	102	34,4
Cu	60,0	13,7
Hg	0,0850	0,128
Ni	84,0	22,8
Pb	14,0	29,8
Zn	70,0	81,2

A partir des teneurs en ETM de la croûte terrestre (Lide, 2005), nous avons estimé les quantités moyennes potentiellement présentes dans les sols agricoles wallons en considérant, comme précédemment, une densité de 1,4 et une couche arable de 30 cm.

Le Tableau 128 reprend les FRS et les FRST moyens wallons pour 42 ETM analysés dans le cadre du projet. Si on les compare avec les FRST du Tableau 126, nous pouvons voir des différences relativement importantes pour le Cd, le Cu et le Ni. Les FRST et FRS calculés et repris dans le Tableau 128 sont donc à considérer uniquement comme des indicateurs de l'ordre de grandeur des FRST et FRS pour les différents ETM.

On peut voir, au Tableau 128, que la plupart des FRST sont relativement bas. Les FRST les plus importants sont ceux du Bi, Cd, Mo, et Zn avec 23,4, 33,3, 25,5 et 22,4 % respectivement.

En ce qui concerne le FRST en Bi, ce sont uniquement les engrais minéraux qui ont été pris en considération. Parmi les 24 engrais minéraux analysés, sept matières avaient des teneurs en Bi supérieures à la limite de détermination avec des teneurs comprises entre 0,1 et 0,7 mg/kg M.B. Les engrais minéraux pour lesquels les teneurs sont inférieures à la limite de détermination ont reçu une valeur de 0,05 mg/kg M.B.

Pour le Cd, les conclusions sont les mêmes que celles du Tableau 127, avec une participation importante des engrais minéraux et des engrais de ferme dans le FRST.

Le Mo et le Zn sont apportés principalement par les engrais de ferme. Ils sont en effet plus riches en Mo et Zn que les engrais minéraux. Les matières exogènes ont elles aussi des teneurs élevées en Zn mais les quantités d'engrais de ferme épandues contrebalancent largement celles des matières exogènes.

Tableau 128. Tableau récapitulatif des apports relatifs en ETM par les trois types de matières fertilisantes prises en compte dans le travail. Pour les engrais minéraux, les valeurs calculées se basent sur les résultats d'analyses du SARM.

ETM	Quantité moyenne présente dans les sols wallons sur base de la teneur dans la coûte terrestre (kg/ha)	FRS moyens wallons (%)			FRST moyen wallon (%)
		Engrais minéraux	Engrais de ferme	Matières exogènes	
As	**7,56**	2,4	1,2	1,0	4,7
Ba	**1785**	0,2	0,9	N.D.	1,1
Bi	**0,0357**	**23,4**	N.D.	N.D.	**23,4**
Cd	**0,630**	**15,5**	**14,0**	3,9	**33,3**
Ce	**279**	0,3	N.D.	N.D.	0,3
Co	**105**	0,1	0,6	N.D.	0,7
Cr	**428**	0,3	0,4	0,1	0,9
Cs	**12,6**	0,1	N.D.	N.D.	0,1
Cu	**252**	0,5	5,0	0,4	5,9
Dy	**21,8**	0,4	N.D.	N.D.	0,4
Er	**14,7**	0,4	N.D.	N.D.	0,4
Eu	**8,40**	0,3	N.D.	N.D.	0,3
Ga	**79,8**	0,05	N.D.	N.D.	0,05
Gd	**26,0**	0,4	N.D.	N.D.	0,4
Ge	**6,30**	0,1	N.D.	N.D.	0,1
Hf	**12,6**	0,1	N.D.	N.D.	0,1
Hg	**0,357**	1,0*	4,1	0,9	6,0
Ho	**5,46**	0,3	N.D.	N.D.	0,3
In	**1,05**	0,4	N.D.	N.D.	0,4
La	**164**	0,4	N.D.	N.D.	0,4
Lu	**3,36**	0,2	N.D.	N.D.	0,2
Mo	**5,04**	1,1	**24,4**	N.D.	**25,5**
Nb	**84,0**	0,1	N.D.	N.D.	0,1
Nd	**174**	0,3	N.D.	N.D.	0,3
Ni	**353**	0,1	1,9	0,1	2,1
Pb	**58,8**	1,9	0,1	1,1	3,0
Pr	**38,6**	0,4	N.D.	N.D.	0,4
Rb	**378**	0,1	N.D.	N.D.	0,1
Sb	**0,840**	3,9	N.D.	N.D.	3,9
Sm	**29,6**	0,4	N.D.	N.D.	0,4
Sn	**9,66**	0,4	N.D.	N.D.	0,4
Sr	**1554**	1,3	0,9	N.D.	2,1
Ta	**8,40**	0,1	N.D.	N.D.	0,1
Tb	**5,04**	0,3	N.D.	N.D.	0,3
Th	**40,3**	0,2	N.D.	N.D.	0,2
Tm	**2,18**	0,3	N.D.	N.D.	0,3
U	**11,3**	4,2	N.D.	N.D.	4,2
V	**504**	0,2	0,5	N.D.	0,7
W	**5,25**	0,4	N.D.	N.D.	0,4
Y	**139**	0,7	N.D.	N.D.	0,7
Yb	**13,4**	0,4	N.D.	N.D.	0,4
Zn	**294**	1,9	**18,9**	1,6	**22,4**
Zr	**693**	0,1	N.D.	N.D.	0,1

* valeurs calculées sur base des analyses du CARAH – le SARM n'analysant pas ces deux éléments.
La notation « N.D. » signifie non déterminé.

c. Localisation des FRST importants identifiés

Les données du projet CAPASOL renseignent des teneurs en ETM pour 234 communes wallonnes. Nous avons donc pu représenter spatialement les FRST au niveau de la Région wallonne. Les communes pour lesquelles aucune valeur n'était renseignée ont été considérées comme ayant une teneur égale à la moyenne wallonne. Ces communes sont mises en évidence par la présence du sigle « * ».

Cadmium

La Figure 46 montre les FRST en Cd pour chaque commune wallonne. On peut voir que la plupart des communes wallonnes avec les FRST les plus élevés sont situées en Ardenne et en Région jurassique. Les FRST de ces communes sont généralement supérieurs à 25 % et peuvent aller jusque 162 % (commune de Martelange). Les flux entrants totaux en Cd dans cette partie de la Wallonie sont en effet plus élevés (voir chapitre 4) alors que les teneurs des sols y sont les plus faibles.

Derrière Martelange, les neuf autres communes dont les FRST sont les plus élevés sont Vresse-sur-Semois, Bouillon, Florenville, Meix-devant-Virton, Neufchâteau, Léglise, Fauvillers et Messancy avec respectivement 52, 62, 52, 70, 74, 52, 53 et 58 %.

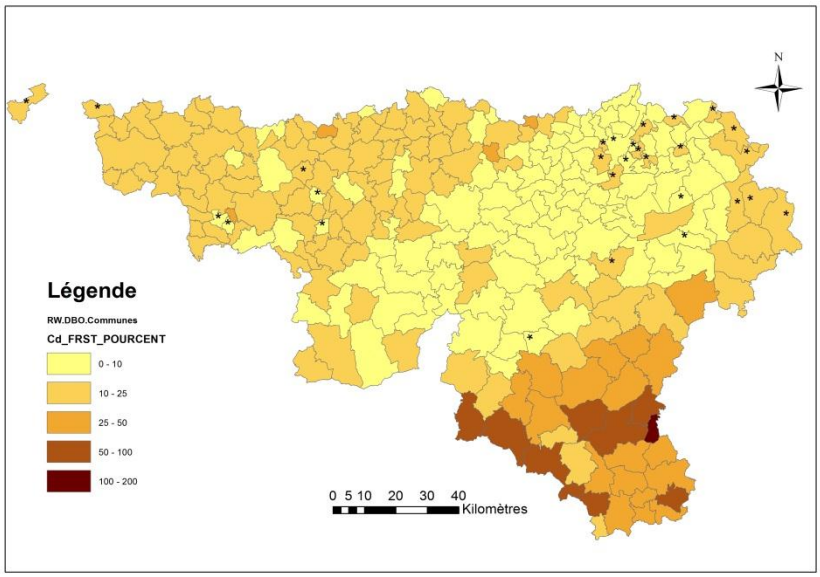

Figure 46. Flux relatifs séculaires totaux en Cd sur les sols agricoles wallons.

Comme le montre le Tableau 126, le FRST du Cd est majoritairement dû aux FRS des engrais minéraux et des engrais de ferme.

Cuivre

Les FRST du Cu sont illustrés par la Figure 47. Un certain nombre de communes situées dans le Hainaut occidental ont des FRST relativement élevés, compris entre 40 et 80 %. En dehors de ces communes, des spots de FRST élevés se trouvent repartis dans la partie nord de la Wallonie. Ce sont les communes de Jurbise, Lobbes et Huy qui ont des FRST respectifs de 66,7, 68,7 et 67,0 %. Le FRST le plus élevé est pour la commune d'Amel avec 94,8 %. C'est dans ces communes que les teneurs en Cu du sol sont parmi les plus faibles de Wallonie ; mise à part la commune de Lobbes, les flux totaux en ETM entrants sur les sols ne sont pas parmi les plus importants.

La vingtaine de communes situées dans le Hainaut occidental avec un FRST relativement important ont des teneurs en Cu dans le sol qui sont assez faibles au niveau de la Région wallonne alors que les flux entrants en Cu sont, avec le Pays de Herve, parmi les plus importants.

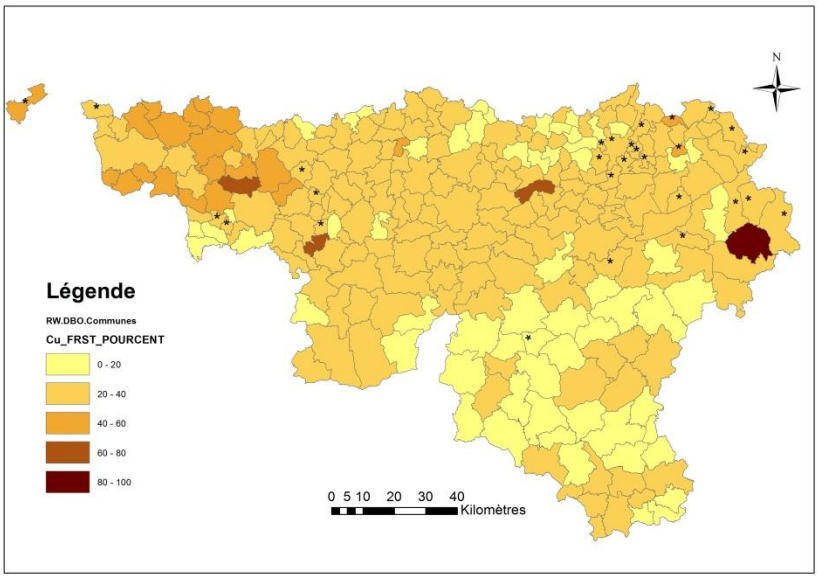

Figure 47. Flux relatifs séculaires totaux en Cu sur les sols agricoles wallons.

Pour le Cu, ce sont majoritairement les engrais de ferme qui sont impliqués dans les FRST (Tableau **126**). Les engrais de ferme dont les scores par rapport à la moyenne sont les plus élevés pour le Cu sont les lisiers de bovin ainsi que le lisier de porc. Les FRST élevés des communes du Hainaut occidental sont majoritairement dus aux matières fécales de porcs riches en Cu provenant de la commune de Comines-Warneton.

Nickel

La Figure 48 illustre les FRST des différentes communes wallonnes pour le Ni. Les FRST en Ni varient de 0 à 30 %. Deux zones avec un FRST en Ni plus important se distinguent sur le territoire de la Région wallonne : dans le Hainaut occidental et la Région herbagère, les FRST sont compris entre 10 et 30 %.

Dans le Hainaut occidental, on compte 26 communes dont le FRST est d'au moins 10 %. Les deux communes avec les FRST les plus importants sont Beloeil et Bernissart avec des FRST respectifs de 28,8 et 26,8 %. En Région herbagère, les communes de Plombière et Welkenraedt ont des FRST respectifs de 26,8 et 26,4 %.

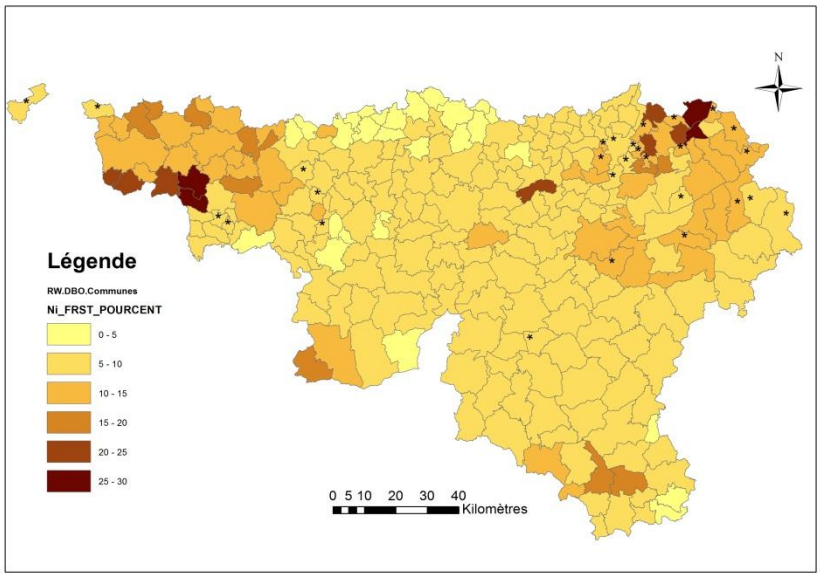

Figure 48. Flux relatifs séculaires totaux en Ni sur les sols agricoles wallons.

Les engrais de ferme sont largement impliqués dans le FRST du Ni (Tableau 126).

Zinc

Les FRST en Zn sur les communes de Wallonie sont compris entre 0 et 50 %. La partie de la Wallonie où les FRST sont les plus importants correspond au Hainaut occidental. Les flux en Zn entrants sont élevés mais ce sont principalement les teneurs faibles des sols qui induisent ces FRST élevés dans cette partie de la Wallonie.

Les FRST les plus élevés sont pour Beloeil et Jurbise avec, de manière respective, des 45,2 et 42,5 %.

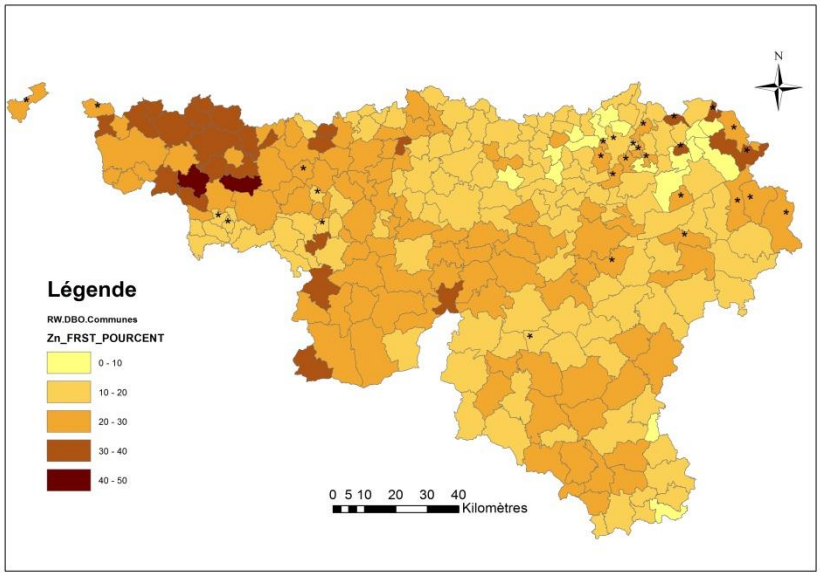

Figure 49. Flux relatifs séculaires totaux en Zn sur les sols agricoles wallons.

Pour le FRST du Zn, ce sont une nouvelle fois les engrais de ferme qui sont largement impliqués (Tableau 126).

Ce sont les lisiers de bovin qui ont les scores par rapport à la moyenne les plus élevés pour le Zn.

3.2.2. CTO

Dans le cadre du projet nous avons fait l'analyse des HAP et des PCB autres que les PCB dioxiniques. Nous avons pu voir que les huit échantillons d'engrais de ferme analysés pour ces deux CTO ne présentent pas de risques particuliers compte tenu des teneurs qui sont inférieures aux normes pour la valorisation des matières recyclables en agriculture.

La revue bibliographique a néanmoins attiré notre attention sur la présence potentielle de substances médicamenteuses dans les excréments des animaux d'élevage en provenance des aliments et des traitements administrés aux animaux. Parmi toutes les substances actives employées, ce sont les sulfonamides et triméthoprimes (sulfadiazines et triméthoprimes), les tétracyclines (doxycyclines et oxytétracyclines) et les pénicillines (amoxycyclines) qui sont les plus courantes.

Les engrais de ferme peuvent aussi contenir des quantités diverses de phénols, phtalates, phosphates triesters, cis- et trans- isosafrol et LAS. Les teneurs mentionnées dans la littérature pour les phtalates et le LAS étant inférieures aux valeurs limites autorisées pour les matières recyclables en Région wallonne. Les phénols, phosphates triesters et cis- et trans- isosafrol n'étant pas repris dans la règlementation wallonne.

D'autres substances comme les solvants halogénés, les hydrocarbures monoaromatiques (HAM dont BTEX) et les pesticides organochlorés sont repris dans les recommandations européennes en matière de surveillance de la qualité des sols.

Les teneurs totales en HAP dans les engrais de ferme sont inférieures à celles présentes dans les matières exogènes valorisées sur les sols agricoles wallons (chapitre 3). En ce qui concerne les PCB, les deux types de matières analysées en contiennent très peu. Les limites de détermination actuelles ne permettent pas de dire lequel des deux types de matière en contient le plus.

4. STRUCTURATION D'UN PLAN DE SURVEILLANCE

4.1. Matières et contaminants à surveiller

4.1.1. Engrais minéraux

La première partie de ce document nous a montré que certains engrais minéraux participent plus à la contamination des sols agricoles par les ETM. De manière globale, les engrais minéraux de première importance à surveiller en ce qui concerne la contamination par les ETM sont :

- le phosphate naturel semi-attaqué ;
- l'engrais composé 12-27-0 ;
- l'engrais composé 18-6-5 ;
- le phosphate diammonium.

Les engrais minéraux se trouvant dans la classe intermédiaire de contribution à la contamination par les ETM sont :

- l'engrais composé 0-6-12 (poudre) ;
- le nitrate d'ammonium ;
- le nitrate d'ammonium (4 % MgO) ;
- l'engrais composé 0-11-11 ;
- la dolomie.

Les autres engrais minéraux, de par leurs teneurs en ETM et les quantités utilisées plus faibles, ne présentent pas de risque important pour les sols agricoles wallons.

L'analyse des contaminants arrivant en plus grandes quantités sur les sols a montré qu'après 100 années de fertilisation au niveau actuel, les teneurs en Cd du sol de certaines communes peuvent potentiellement doubler. La majeure partie du flux en Cd provenant des engrais minéraux.

Dans les communes où les FRST sont les plus importants en Cd (voir Figure 46), les engrais minéraux à surveiller en priorité pour leurs teneurs en Cd sont, dans l'ordre d'importance :

- le phosphate diammonium ;
- le phosphate naturel semi-attaqué ;
- l'engrais composé 12-27-0 ;
- l'engrais composé 0-11-11 ;
- l'engrais composé 18-6-5 ;
- le triple superphosphate.

4.1.2. Engrais de ferme

Les engrais de ferme classés dans la catégorie de priorité en ce qui concerne la contamination globale des sols agricoles wallons par les ETM sont :

- le lisier de bovin viande des exploitations herbagères ;
- le fumier de bovin viande des exploitations herbagères ;
- le lisier de bovin lait des exploitations herbagères.

Les engrais de ferme se trouvant dans la classe intermédiaire de contribution à la contamination par les ETM sont :

- le lisier de bovin viande des exploitations polyculture/élevage ;
- le fumier de bovin viande des exploitations polyculture/élevage ;
- le lisier de bovin lait des exploitations polyculture/élevage.

L'analyse des ETM présentant les FRST les plus élevés nous a permis de cibler le Cd, le Cu, le Ni et le Zn. Pour le Cd, les engrais de ferme ont un FRS similaire aux engrais minéraux. Pour le Cu, Ni et Zn, les engrais de ferme sont les matières fertilisantes ayant, de loin, les FRS les plus élevés.

Dans les parties de la Wallonie où les FRST les plus élevés ont été identifiés pour ces quatre ETM, les engrais de ferme à surveiller en priorité sont donc :

- le lisier de bovin lait ;
- le lisier de bovin viande ;
- le fumier de bovin viande.

En ce qui concerne le Cu et le Zn, le Hainaut occidental, est identifié comme une zone où les FRST sont les plus importants. Le lisier de porc à l'engraissement participe de manière importante à ces FRST localisés élevés en Cu et Zn. Les teneurs en Cu dans le lisier de porc à l'engraissement sont donc également à surveiller dans le Hainaut occidental.

4.1.3. Matières exogènes

Pour les quatre ETM identifiés, les matières exogènes ne participent que très faiblement aux FRST. Même si un ordre d'importance des matières peut être établit en fonction des scores, aucune matière ne sera ciblée spécifiquement pour le plan de surveillance.

4.1.4. Fréquence du suivi

La fréquence du suivi par l'analyse de matières dépend du type de matières fertilisantes considéré. Les engrais de ferme et les pratiques d'élevage qui y sont associées sont potentiellement plus stables que l'évolution potentielle des teneurs en ETM dans les engrais minéraux. Ces derniers sont en effet plus susceptibles de connaître des évolutions rapides par un changement de fournisseur suite à l'évolution des prix voire du changement de l'origine des matières premières en fonction de l'épuisement des réserves. Le simple fait d'exploiter un gisement plus en profondeur peut suffire à augmenter les teneurs en ETM des phosphates par exemple.

Un intervalle d'échantillonnage de cinq à dix ans semble être un compromis adéquat pour mesurer les évolutions de teneur en contaminants dans les engrais de ferme tandis qu'un sondage plus récurrent de l'ordre de cinq ans semble être un délai pertinent pour les engrais minéraux.

4.2. Matières et contaminants potentiels à détecter et à surveiller

Les CTO analysés dans le cadre de ce projet ont été limités au HAP et PCB. Ce sont en effet les deux seuls CTO qui sont actuellement dosables, ou acceptés pour être dosés, dans les engrais de ferme.

Comme mentionné précédemment, la revue bibliographique a mis en avant d'autres CTO potentiellement présents dans les engrais de ferme.

Il serait donc intéressant de favoriser le développement de techniques d'analyses standardisées pour le dosage des composés suivants dans les engrais de ferme :

- les antibiotiques et en particulier :
  - la sulfadiazine ;
  - le triméthoprime ;
  - la doxycycline ;
  - l'oxytétracycline ;
  - l'amoxycylline ;
- les phénols ;
- les phtalates ;
- les phosphates triesters ;
- le LAS (Alkylbenzène sulfonates) ;
- le cis- et trans-isosafrol.

4.3. Améliorations des estimations

La méthodologie qui a été développée dans cette étude devrait permettre de suivre l'évolution des flux dans le temps et donc d'évaluer l'impact de la modification des pratiques de fertilisation ou de la mise en œuvre d'actions spécifiques pour réduire les risques de contamination. Un point clé de la surveillance des flux entrants en ETM sera donc l'amélioration continue de la précision des informations contenues dans la base de données mise en place par l'actualisation régulière de ces données et son enrichissement en informations nouvelles.

4.3.1. Estimation des flux de matière

a. Engrais minéraux

Dans le calcul des flux des engrais minéraux arrivant sur les sols agricoles wallons, nous avons pu appréhender les limites des données disponibles. C'est en effet l'estimation de ces flux de matières

qui a nécessité le plus de généralisations et d'hypothèses de travail au niveau qualitatif principalement.

On a vu dans le chapitre 2 que le secteur des engrais minéraux en Belgique et en Wallonie est relativement complexe et que la connaissance des quantités et des matières utilisées n'est pas complète. La détermination des types et des quantités d'engrais minéraux utilisés en Wallonie a été estimée par la récolte d'informations provenant de sources multiples : association de producteurs, fournisseurs, données du RICA. Etant donné la difficulté d'estimer les quantités d'engrais minéraux réellement épandus sur les sols agricoles wallons, l'approche retenue a été d'exprimer les flux en quantité de nutriments par hectare et par année.

Idéalement, l'estimation des flux d'engrais minéraux devrait être réalisée de manière plus locale. Pour ce faire, un recensent qualitatif systématique des matières fertilisantes minérales utilisées par les agriculteurs serait intéressant à intégrer dans les enquêtes agricoles menées de manière régulière au niveau de la Wallonie (RICA par exemple). L'utilisation des engrais minéraux peut en effet varier fortement en fonction des prix, des régions, des cultures, des affinités et des habitudes des agriculteurs. Cela permettrait d'identifier de manière très ciblée les risques de contamination des sols par les engrais minéraux. Des engrais minéraux plus riches en ETM et très peu utilisés au niveau de la Région wallonne (comme le superphosphate) pourraient ainsi être identifiés comme des matières minérales à risques si les quantités appliquées localement sont importantes. De plus, d'autres matières non recensées dans les statistiques globales au niveau de la Région wallonne pourraient être identifiées et analysées en cas d'utilisation en quantités relativement importantes.

De plus, les données existantes sur le commerce des engrais minéraux au niveau de la Belgique devraient être harmonisées afin d'être en mesure de produire des résultats cohérents entre les différentes sources et permettre le suivi de l'évolution du commerce dans le temps.

Des données très utiles nous ont été transmises par les principaux fournisseurs d'engrais minéraux en Wallonie (Wal.Agri, SCAM et SCAR). Un partenariat devrait être envisagé afin de pouvoir réaliser les estimations d'utilisation des engrais minéraux en Région wallonne sur des données qualitatives et quantitatives plus précises. Cela permettrait de cibler de manière très précise les engrais minéraux les plus commercialisés et permettrait de voir l'évolution de leur utilisation au cours du temps de manière plus fine.

b. Engrais de ferme

Les quantités d'engrais de ferme épandus sur les sols agricoles wallons ont été estimées en se basant principalement sur le recensement du cheptel de 2008 (issu du système SANITEL). Le recensement qui nous a permis de déterminer les stabulations sur lesquelles se trouvaient les animaux date de 1996.

Etant donné que les quantités et les catégories d'engrais de ferme produits (et considérées comme épandues) sur les sols agricoles wallons, dépendent des stabulations sur lesquelles se trouvent les animaux, il serait intéressant d'actualiser ce recensement afin de gagner en justesse dans l'estimation des flux d'engrais de ferme.

Les enquêtes agricoles pourraient prévoir de récolter des informations relatives aux quantités et la qualité des additifs et des médicaments administrés aux animaux d'élevage.

4.3.2. Validation et affinement des flux entrants en ETM

Il serait intéressant de valider les estimations faites dans ce projet par des observations menées à l'échelle des exploitations ou des parcelles de manière à évaluer l'importance des sources d'incertitudes et afin d'améliorer le calcul des flux à l'échelle de la Région wallonne.

Une approche des flux à l'échelle des parcelles agricoles permettrait de calculer les flux de contaminants apportés par l'ensemble des intrants (flux cumulés sur une même surface et sur une

période donnée). Cela permettrait de relativiser assez précisément les parts des différentes sources d'apports sur les parcelles agricoles. Une même parcelle peut en effet recevoir des produits phytosanitaires et des engrais minéraux, des engrais de ferme, des matières exogènes et des dépôts atmosphériques. Les produits phytosanitaires bien qu'appliqués sur les plantes ou sur le sol sont plus souvent suivis dans les eaux souterraines que dans le sol, tel que requis par la Directive concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques (91/414/CEE). Dans certains cas (zones à risque), le suivi des quantités de pesticides appliqués sur le sol serait cependant nécessaire. Les produits phytosanitaires contenant des ETM sont le plus souvent des fongicides (fongicides à base de Cu et de Zn). Cela concerne surtout les cultures sur lesquelles sont pratiqués des traitements phytosanitaires fréquents, en particulier, pour les fongicides, en culture de pomme de terre. Le rapport de l'ADEME (ADEME, 2007) indique un apport moyen en France de 228 g Zn/ha/an et de 2500 g Cu/ha/an en culture de pomme de terre.

Cette étude devrait également être complétée par l'estimation des flux de sortie (prélèvement par les plantes, lessivage par les eaux) afin de mieux appréhender les phénomènes d'accumulation en relation avec les pratiques agricoles.

Il serait également très intéressant de compléter ce bilan par l'étude de la part d'ETM circulant en circuit fermé dans le système sol-plante-animal. Cela permettrait de relativiser les quantités souvent plus importantes en ETM voyageant via les engrais de ferme.

4.3.3. La représentativité des échantillons

Les propriétés des matières fertilisantes peuvent varier de manière considérable en fonction de l'origine des matières premières ou des modes de production qui sont à leur origine.

a. Engrais minéraux

Echantillonnage

L'échantillonnage des engrais minéraux réalisé dans le cadre de ce travail n'a pu considérer que les engrais minéraux commercialisés par Wal.Agri et la SCAM au moment de l'échantillonnage. Or, en fonction des saisons et des cultures en place, différents types d'engrais minéraux (et variantes d'engrais composés) sont proposés aux agriculteurs. Comme mentionné précédemment, les teneurs en ETM peuvent varier de manière importante en fonction des fournisseurs et des dépôts exploités. Afin d'avoir une meilleure représentativité de la contamination des engrais minéraux sur une année complète, il faudrait étaler la période d'échantillonnage sur toute l'année afin de pouvoir prendre en considération une palette plus large d'engrais minéraux.

Analyses

Comme mentionné dans le chapitre 3, les analyses réalisées par le SARM renseignent des teneurs en ETM systématiquement plus élevées par rapport aux analyses du CARAH. Il serait donc nécessaire de déterminer une méthode d'analyse des teneurs totales qui permette de rendre les résultats d'analyse facilement comparables.

b. Engrais de ferme

Les engrais de ferme sont par nature très hétérogènes dans leur composition. De ce fait, une qualité de prélèvement insuffisante entraîne une fluctuation et une augmentation de l'incertitude de la mesure. Par conséquent, le problème majeur des données existantes est celui de la précision et de la représentativité des prélèvements. La représentation des résultats par unité administrative est susceptible d'empêcher la détection fiable d'évolutions temporelles qui sont généralement de faible amplitude en regard des variations au sein ou entre exploitations. Ce type d'analyse n'est pas suffisant pour assurer un suivi complet des flux d'éléments contaminants dans les sols. Pour optimiser la surveillance des flux, il est nécessaire de réduire l'incertitude de la mesure en adaptant

la stratégie d'échantillonnage. Une enquête préalable auprès des exploitations échantillonnées doit permettre d'estimer le degré d'homogénéité d'un lot de matière étudié par vérification de l'origine de ses composantes et les sources potentielles de contamination au travers des aliments ou des médicaments utilisés.

Pour être représentatif des flux à l'échelle de la région, un réseau de surveillance devrait couvrir les principales formes d'utilisation des terres (types de cultures), les matières fertilisantes utilisées, les systèmes de gestion des exploitations (polyculture, élevage, mixte), les types de sols et les contaminations présents dans un plan d'échantillonnage stratifié. L'échantillonnage stratifié est beaucoup plus puissant dans ce cas parce qu'il prend en compte ces facteurs de manière explicite et rend l'interprétation des données beaucoup plus facile.

4.3.4. Estimation des flux relatifs

Les flux relatifs séculaires (FRS) qui ont été calculés en fonction des données disponibles issues du projet CAPASOL donnent un bon aperçu général de la situation en Wallonie pour le Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb et Zn. Il faut néanmoins noter que certaines communes ont un nombre d'analyses limité (parfois une seule analyse par commune). Il serait donc intéressant d'investiguer plus intensément les sols de ces communes afin de préciser les estimations pour ces sept ETM.

L'analyse des FRS en ETM par rapport à la croûte terrestre montre que pour le Bi et le Mo, les FRST sont relativement plus élevés. Il conviendrait donc d'avoir une idée générale de la teneur en Bi et Mo des sols wallons afin de confirmer ou rejeter cette constatation. De plus, il serait intéressant d'élargir la liste des ETM analysés dans les sols à d'autres ETM particulièrement toxiques comme l'As, Ba, Be, U et V afin de vérifier l'absence de risques.

L'évaluation des flux entrants en ETM, même si elle apporte des éléments d'aide à la décision pour mettre en place un plan de surveillance, ne prend pas en compte certains paramètres concernant les risques associés permettant la détermination des priorités d'action plus ciblées. Les quantités totales d'ETM arrivant sur les sols sont en effet des valeurs globales qui ne prennent pas en compte les différentes formes chimiques. Celles-ci ne posent pas les mêmes problèmes en termes d'écotoxicité et d'accumulation dans l'environnement. Ainsi, il pourra être judicieux de procéder à l'actualisation du bilan en relation avec de nouvelles connaissances sur la toxicité sur certains éléments contaminants en relation avec la vulnérabilité du milieu.

5. CONCLUSIONS

Les flux en ETM et en CTO entrants sur les sols agricoles par l'intermédiaire des matières fertilisantes ne posent, *a priori*, pas de problèmes majeurs en Région wallonne. Cependant, pour un certain nombre de matières, nous avons pu mettre en évidence des apports potentiels en ETM en quantités relatives importantes.

Les matières qui ont retenu notre attention sont les engrais phosphatés et les engrais de ferme. Les engrais phosphatés tels que le phosphate diammonium, le phosphate naturel semi-attaqué, les engrais composés 12-27-0, 0-11-11 et 18-6-5 et le triple superphosphate sont les sources majeures en Cd sur les sols agricoles wallons. Les engrais de ferme apportent quant à eux des quantités plus importantes en Cu, Ni et Zn. Ce sont principalement les lisiers de bovins et les fumiers de bovin viandeux qui apportent, de par les quantités de matière produites, les quantités les plus importantes en ces trois ETM. Notons également l'importance locale des lisiers de porc à l'engraissement dans la contribution des apports en Cu et Zn. D'autres substances qui n'ont pas pu être mesurées au cours de ce travail seraient intéressantes à mesurer. Ces substances sont en particulier les antibiotiques, les phénols, les phtalates, les phosphates triesters, le LAS (Alkylbenzène sulfonates) et le cis- et trans-isosafrol.

Nous avons pu voir que l'évaluation des flux en ETM arrivant sur les sols agricoles wallons est assez délicate. Un certain nombre d'améliorations et d'actualisations des données utilisées dans le calcul des flux permettrait de gagner en précision et en représentativité. Pour certaines matières prises en compte dans le calcul, il serait nécessaire d'aller plus loin dans l'investigation. La part d'ETM endogène/exogène présents dans les flux en ETM issus des engrais de ferme serait par exemple un complément important voire essentiel afin d'appréhender au mieux les flux estimés. Aussi, l'évaluation du degré de toxicité des différentes formes des substances prises en considération dans ce travail permettrait un ciblage plus précis des contaminants à surveiller, de mieux qualifier les risques réels (associer risque et vulnérabilité), d'identifier des actions de prévention et les actions correctives à mener. Notons par exemple qu'un certain nombre d'ETM sont des oligo-éléments, comme le Zn.

Une meilleure connaissance du milieu dans lequel les contaminants identifiés sont apportés permettrait de mieux relativiser les flux entrants sur les sols.

La surveillance des flux entrants des contaminants sélectionnés et des matières fertilisantes dans les systèmes agricoles peut aider à l'amélioration des pratiques agricoles. Étant donné le grand nombre d'exploitations agricoles en Région wallonne, les informations devraient pouvoir être agrégées dans des indicateurs de performance ou indicateurs de durabilité. Le suivi d'exploitations pilotes afin de mettre en évidence les pressions et les impacts que représente l'utilisation des matières fertilisantes est un complément indispensable pour appréhender les différentes facettes de la contamination des sols par les matières fertilisantes.

Tous ces aspects impliquent de pouvoir assurer une veille scientifique permanente, de promouvoir le développement de nouvelles techniques d'analyse et de communiquer sur les bonnes pratiques agricoles permettant de réduire l'utilisation des intrants à risque.

Une manière simple et pragmatique de réduire les risques liés aux apports en ETM sur les sols agricoles wallons est de favoriser une fertilisation au plus près des besoins réels des spéculations. Et cela, de manière à apporter les quantités d'ETM les plus limitées par rapport à la nécessité de fertiliser. Une diminution des apports en ETM serait alors déjà visible dans certaines zones de la Wallonie où les apports sont trop importants par rapport aux besoins comme en Ardenne.

6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

6.1. Documents

ADEME (2007). Bilan des flux de contaminants entrant sur les sols agricoles de France Métropolitaine. Bilan qualitatif de la contamination par les éléments tracés métalliques et les composés tracés organiques et application quantitative pour les éléments tracés métalliques. Angers, France, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME). Rapport final. 329 pp.

Anonyme (1986). DIRECTIVE DU CONSEIL du 12 juin 1986 relative à la protection de l'environnement et notamment des sols, lors de l'utilisation des boues d'épuration en agriculture. L 181/6 - L 181/12.

6.2. Sites web

Lide, D. (2005). CRC Handbook of Chemistry and Physics, 85th Edition. CRC Press. Boca Raton, Florida. URL : http://en.wikipedia.org/wiki/Abundances_of_the_elements_(data_page), consulté le 18/06/2012.

DELIVRABLES PRODUITS DANS LE CADRE DU PROJET CONTASOL

D.1.1. Les sources d'éléments de contamination dans les matières fertilisantes utilisées en Wallonie

D.1.2. Proposition de note de base pour l'étude de la problématique des germes pathogènes

D.2. Estimation des flux de matières fertilisantes épandues sur les terres agricoles en Région wallonne

D.3. Teneurs moyennes d'ETM et de CTO dans les matières fertilisantes utilisées en Région wallonne

D.4. Flux potentiels de contaminants ETM en Région wallonne et représentations spatiales (=D.7.)

D.5. Plan de surveillance des risques de contamination des sols par les ETM ou les CTO présents dans les matières fertilisantes