



HAL
open science

Construction d'un modèle de prédiction des flux de cuivre et de zinc en filière porcine

Emma Gourlez, Christine Baratte, Fabrice Béline, Jean-Yves Dourmad, Alessandra N. T. R. Monteiro, Ludovic Brossard, Florence Garcia-Launay, Francine de Quelen

► To cite this version:

Emma Gourlez, Christine Baratte, Fabrice Béline, Jean-Yves Dourmad, Alessandra N. T. R. Monteiro, et al.. Construction d'un modèle de prédiction des flux de cuivre et de zinc en filière porcine. 55. Journées de la recherche porcine (JRP), INRAE; IFIP, Jan 2023, Saint-Malo, France. pp.269-274 | 689, 10.1016/j.anscip.2023.06.082 . hal-04179214

HAL Id: hal-04179214

<https://hal.inrae.fr/hal-04179214v1>

Submitted on 9 Aug 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Construction d'un modèle de prédiction des flux de cuivre et de zinc en filière porcine

Emma GOURLEZ (1,2,3), Christine BARATTE (1), Fabrice BELINE (2), Jean-Yves DOURMAD (1), Alessandra MONTEIRO (3), Ludovic BROSSARD (1), Florence GARCIA-LAUNAY (1), Francine DE QUELEN (1)

(1) UMR PEGASE, INRAE, Institut Agro, 35590 Saint-Gilles, France

(2) UR OPAALE, INRAE, 35044 Rennes, France

(3) Animine, 10 rue Léon Rey Grange, 74960 Annecy

emma.gourlez@inrae.fr

francine.dequelen@inrae.fr

Construction d'un modèle de prédiction des flux de cuivre et de zinc en filière porcine

Le cuivre (Cu) et le zinc (Zn) sont des éléments traces métalliques (ETM), représentant un risque environnemental, notamment après épandage des effluents sur les terres agricoles. Ce sont également des minéraux essentiels pour la croissance et la bonne santé des porcs. Cependant, plus de 90 % du Cu et du Zn ingérés par les porcs se retrouvent dans leurs déjections. Différentes stratégies de traitement des effluents permettent de réduire les risques environnementaux liés à cette excrétion. Pour optimiser ces stratégies, il est nécessaire de bien connaître et estimer leurs flux selon les pratiques. Pour cela, un modèle prédisant les flux de Cu et de Zn depuis l'aliment jusqu'au sol, en passant par l'atelier porcin et le traitement des effluents, a été développé. Ce modèle basé sur un bilan annuel des flux et orienté objet permet de simuler une grande diversité de chaînes de gestion des effluents. Les teneurs en Cu et en Zn dans les déjections des porcs sont calculées, d'une part, à partir des quantités d'aliments distribuées et de leur composition et, d'autre part, à partir des performances d'un animal moyen (indice de consommation, poids vif), par différence entre les quantités ingérées et retenues de Cu et de Zn. Leurs teneurs sont ensuite prédites dans les produits issus de différents traitements (stockage, séparation de phases, méthanisation, compostage...), à partir d'une matrice de coefficients de répartition des différents éléments dans différentes phases. Les valeurs de ces coefficients de répartition sont issues de la bibliographie. Des exemples de simulation pour différentes stratégies d'alimentation et de gestion des effluents illustrent ce modèle. Utilisé en rétro-ingénierie, ce modèle permet également de définir des teneurs en Cu et Zn de l'aliment visant à atteindre des objectifs spécifiques de teneurs dans les produits.

Construction of a model to predict copper and zinc fluxes in pig production

Copper (Cu) and zinc (Zn) are trace metals, which represent an environmental risk, especially after applying manure on agricultural land. They are also essential minerals for the growth and good health of pigs. However, more than 90% of the Cu and Zn ingested by pigs are found in their manure. Different manure treatment strategies are used to reduce this environmental risk due to this excretion. To optimize these strategies, it is necessary to know and estimate their flows as a function of different management practices. A model was built to predict Cu and Zn flows from the feed to the soil, through swine production and manure management. This object-oriented model, based on an annual flow balance, was used to simulate a wide variety of manure treatment chains. Cu and Zn levels in pig manure are calculated from the amount of feed distributed, its composition, and the animal's performance (feed conversion ratio, live weight), as the amounts of Cu and Zn ingested minus those retained. Their levels are then predicted in the manure products that result from various treatments (e.g. storage, phase separation, anaerobic digestion, composting), based on a matrix of distribution coefficients of multiple elements in different phases. Values of these distribution coefficients were taken from the literature. Example simulations for different feeding and manure management strategies illustrate the model. When used in an inverse sense, the model can also be used to define Cu and Zn levels in the feed that achieve specific objectives for levels in the final manure products.

INTRODUCTION

Le cuivre (Cu) et le zinc (Zn) sont des éléments traces métalliques, qui peuvent avoir un impact sur l'environnement. Ils peuvent notamment s'accumuler dans les sols et être la cause de problèmes environnementaux de long-terme (López Alonso *et al.*, 2000). De plus, ils sont potentiellement toxiques pour les plantes et les microorganismes du sol (McGrath, 1981).

Le Cu et le Zn sont également des minéraux essentiels pour la croissance et la santé des porcs (Männer, 2008), ils sont donc utilisés en supplémentation dans leur alimentation. Cependant, ils sont très peu absorbés par le porc et près de 90-99% du Cu et 90-96% du Zn ingérés par les porcs se retrouvent dans leurs déjections (Jondreville *et al.*, 2004 ; Dourmad *et al.*, 2015), qui sont ensuite épandues sur les terres agricoles. En effet, en France, l'épandage des effluents d'élevage contribue à 50% et 78% des apports, respectivement, de Cu et Zn sur les surfaces agricoles (Belon *et al.*, 2012). Actuellement des réglementations encadrent ces rejets. Ainsi, depuis juillet 2022, dans l'Union Européenne, les teneurs maximales de Cu et de Zn autorisées dans les engrais organiques sont de, respectivement, 300 et 800 mg/kg de matière sèche (Règlement (UE) N°2019/1009). Il n'y a cependant pas de contraintes pour l'épandage des effluents bruts.

Deux leviers d'action peuvent être identifiés pour optimiser l'utilisation du Cu et du Zn et ainsi réduire leur impact environnemental (Gourlez *et al.*, 2022). Le premier est le levier alimentaire, qui est également soumis à la réglementation européenne (teneurs maximales autorisées de, respectivement, 150 - 100 et 150 mg/kg de Cu et Zn dans les aliments porcelets en post-sevrage et 25 et 120 mg/kg de Cu et de Zn dans l'aliment du porc à l'engraissement, Règlementation (UE) N°2016/1095 et (UE) N°2018/1039). Le second levier est le traitement des effluents porcins par différentes méthodes (séparation de phases, méthanisation, compostage ...), qui permet de redistribuer le Cu et le Zn dans des fractions plus facilement exportables vers des régions moins excédentaires, voire carencées en ces minéraux (GIS Sol, 2011).

Afin d'optimiser l'utilisation du Cu et de Zn dans la filière porcine, il est donc nécessaire de mieux comprendre et maîtriser leurs flux sur le continuum aliment-déjection-traitement-sol. Dans cet objectif, un modèle a été construit afin d'estimer ces flux selon les pratiques mises en place. Cet article vise à présenter la démarche de construction de l'outil et les premiers résultats.

1. MATERIEL ET METHODES

1.1. Structure générale du modèle

Le modèle RECUIZ (REcyclage du CUIvres et du Zinc) est un modèle orienté objet, construit en quatre modules représentant le troupeau, le logement, les traitements et les importations (correspondant aux apports extérieurs) (Figure 1). Ces modules sont en partie basés sur des modèles déjà publiés (Dourmad *et al.*, 2002 ; Rigolot *et al.*, 2010a et b). Chaque module comprend une ou plusieurs entrées et une ou plusieurs sorties. Chaque entrée et chaque sortie sont définies par un type et des caractéristiques, qui seront décrits par la suite.

Le modèle RECUIZ est développé en Python 3.10. C'est un modèle basé sur un bilan annuel des flux.

Chaque module contient une classe principale : (i) Troupeau, (ii) Bâtiments, (iii) Chaîne de traitement et (iv) Importation. Chaque

classe comprend des sous-classes. Ces classes sont reliées les unes aux autres et représentent chacune une étape de l'élevage et de la production et gestion de l'effluent final. Ainsi, les processus mis en place à une étape donnée dépendent de ce qui s'est passé à l'étape précédente. En effet, ce modèle repose sur un calcul de bilans de masse en entrée et en sortie de chaque classe. Les critères pris en compte sont la quantité annuelle de produits générés en sortie ainsi que les quantités de matière sèche (MS), de matière organique (MO), de macro-éléments (N, P, K) et d'oligo-éléments (Cu et Zn).

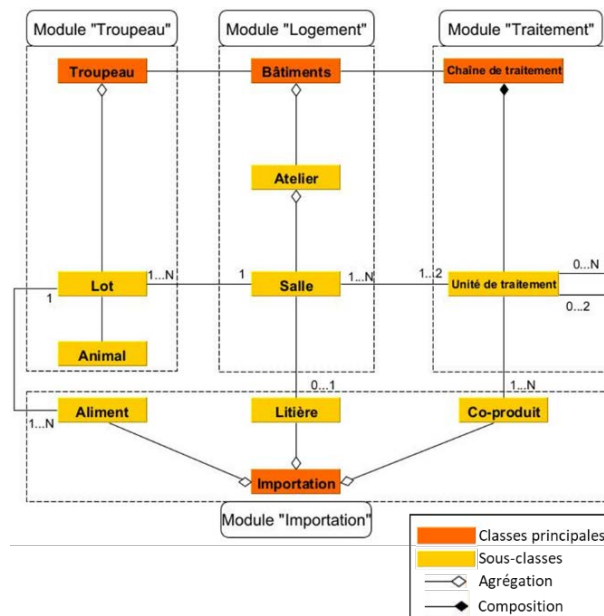


Figure 1 – Diagramme de classes du modèle

Dans la suite de la description les classes sont mentionnées en italique et les sous-classes en italique et souligné.

1.2. Descriptions des classes

1.2.1. Importation

La classe *Importation* permet de décrire les importations de biomasses possibles au sein de l'élevage porcine et des unités de traitement. Les sous-classes *Aliment*, *Litière* et *Co-Produit* composent la classe *Importation*. Les apports de biomasse aux animaux sont pourvus par les aliments et sont liés aux lots. Cela signifie qu'un ou plusieurs aliments sont définis pour chaque lot. Les apports de litière (paille ou sciure) sont réalisés au niveau des salles d'élevage. Finalement, les importations peuvent être réalisées au niveau des unités de traitement et correspondent aux co-substrats de traitement utilisés (paille pour compostage ou autres substrats extérieurs pour la méthanisation, par exemple).

Les importations sont définies par plusieurs caractéristiques : leur quantité (en kg) et leurs teneurs en MS (%), en MO (%), en macro-éléments (g/kg) et en oligo-éléments Cu et Zn (mg/kg).

Une base de données décrivant les caractéristiques des aliments, des litières et des co-substrats est utilisée comme entrée du modèle.

1.2.2. Troupeau et types d'animaux

Le *Troupeau* est composé de plusieurs *lots* eux-mêmes composés de plusieurs *animaux* (Figure 1). Chaque *lot* est composé d'un certain nombre d'animaux qui ont tous le même type et les mêmes caractéristiques. Actuellement, deux types d'animaux sont représentés dans le modèle : les porcelets en post-sevrage et les porcs à l'engraissement.

- Données d'entrée

Les caractéristiques prises en compte pour les deux types d'animaux utilisés dans le modèle sont leurs poids vifs en entrée et en sortie de l'élevage (PVI et PVF, kg), leur indice de consommation (IC, kg/kg) et leur taux de muscles des pièces (TMP, %) au poids d'abattage. Un nombre d'animaux est attribué à chaque lot. Le nombre de lots élevés par an est défini, afin de déterminer la production totale d'effluents sur une année. Chaque lot se voit attribuer un à plusieurs aliments, ainsi que la proportion de chaque aliment dans la ration totale.

- Calcul de l'ingéré

La quantité de chaque élément ingéré est calculée à partir du gain de poids sur la période étudiée (PVF-PVI), de l'IC et de la teneur de l'élément dans l'aliment moyen ingéré :

$(N, P, K, Cu, Zn)_{\text{ingéré}} = (PVF - PVI) \times IC \times [N, P, K, Cu, Zn]_{\text{aliment}}$
avec $[N, P, K, Cu, Zn]_{\text{aliment}}$, la teneur de ces éléments dans l'aliment.

- Calcul de la rétention corporelle

Les quantités de N, P, K, Cu et Zn retenues par l'animal sont calculées en fonction de son gain de poids sur la période étudiée. Ces calculs sont basés sur les publications de Rigolot *et al.* (2010a) et du RMT Elevage et Environnement (Dourmad *et al.*, 2015).

Les quantités de N, P, K, Cu et Zn retenues sont calculées à partir du gain de poids sur la période étudiée de l'animal (Rigolot *et al.*, 2010a) :

$$N_{\text{retenu}} (\text{kg/porc}) = \Delta_{\text{fin-initial}} \left(e^{-0,9959 - 0,0145 \times \text{TMP}} \times 0,96 \times \text{PV}^{0,7417 + 0,0044 \times \text{TMP}} / 6,25 \right)$$

$$P_{\text{retenu}} (\text{g/porc}) = 5,35 \times (PVF - PVI)$$

$$K_{\text{retenu}} (\text{g/porc}) = \Delta_{\text{fin-initial}} (-0,0034 \times \text{PV}^2 + 2,53 \times \text{PV})$$

$$Cu_{\text{retenu}} (\text{mg/porc}) = 1,1 \times (PVF - PVI)$$

$$Zn_{\text{retenu}} (\text{mg/porc}) = 21,8 \times (PVF - PVI)$$

- Calcul de l'excrétion

Les quantités excrétées sont ensuite obtenues par différence entre les quantités ingérées et les quantités retenues dans la masse corporelle, et ce pour chaque élément :

$$(N, P, K, Cu, Zn)_{\text{excrété}} = (N, P, K, Cu, Zn)_{\text{ingéré}} - (N, P, K, Cu, Zn)_{\text{retenu}}$$

Le modèle calcule également les quantités de MS et MO excrétées par les animaux :

$$MS_{\text{Fèces}} = \text{Quantité aliment ingérée} \times MS_{\text{Aliment}} \times (1 - \text{CudMS})$$

$$MO_{\text{Fèces}} = \text{Quantité aliment ingérée} \times MO_{\text{Aliment}} \times (1 - \text{CudMO})$$

Avec CudMS, le coefficient de digestibilité de la MS de l'aliment (Rigolot *et al.*, 2010a) :

$$\text{CudMS} = 0,709 + (17,94 \text{ ED} - 0,49 \text{ NDF} - 1,09 \text{ MM}) / \text{MS}$$

et CudMO, le coefficient de digestibilité de la MO de l'aliment (Rigolot *et al.*, 2010a) :

$$\text{CudMO} = 0,744 + (14,69 \text{ ED} - 0,50 \text{ NDF} - 1,54 \text{ MM}) / \text{MS} / (\text{MO}/\text{MS})$$

avec ED, l'énergie digestible de l'aliment (en MJ/kg), NDF son taux de fibre (en g/kg) et MM sa teneur en matières minérales (en g/kg).

Finalement, la masse d'excréta produite est calculée à partir de la quantité de MS excrétée, en prenant un taux moyen de MS des excréta de 10%.

Dans le modèle, ces variables sont calculées au niveau de l'*Animal* et sont multipliées par le nombre de porcs du *lot* pour connaître la production totale d'excréta du *lot*. Ainsi, les sorties de la classe *Lot* correspondent aux quantités de déjections et d'éléments excrétés par les animaux, sans prendre en compte leur stockage au bâtiment. Les sorties de la classe *Lot* sont utilisées comme entrées de la classe *Salle*.

1.2.3. Bâtiments

Les *Bâtiments* sont composés de plusieurs *Ateliers*, eux-mêmes

composés d'une ou plusieurs *salles* (Figure 1). Ce modèle ne s'intéresse qu'aux élevages en bâtiment et ne prend pas en compte les sols en extérieur. Deux types de sols sont considérés, sol sur caillebotis intégral et sol sur litière. Ainsi chaque *salle* va être caractérisée par un type de sol et va être reliée à un *lot* d'animaux (Figure 1).

Les pertes gazeuses au bâtiment de NH₃, N₂O, N₂, CH₄ et CO₂ sont prises en compte pour calculer les caractéristiques des produits sortis du bâtiment. Des facteurs de transformation, compris entre 0 et 1, sont appliqués à chaque paramètre en fonction du type de bâtiment et pour chaque phase obtenue afin de réaliser le bilan de masse (Tableau 1). Ces facteurs sont égaux à 1 pour les éléments non volatiles (P, K, Cu et Zn), puisqu'aucune perte n'est observée. Les pertes d'azote sont liées aux émissions d'ammoniac (NH₃), de protoxyde d'azote (N₂O) et de diazote (N₂). Les facteurs d'émissions de NH₃ et N₂O sont issus des références utilisées dans l'outil GEREPE du RMT Elevage et Environnement (GEREPE, 2018), les émissions de N₂ sont estimées à 9 fois les émissions de N₂O (F. Beline, communication personnelle). Dans cette approche, les pertes de MO sont considérées équivalentes aux pertes cumulées de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂). Ces émissions sont également calculées selon les méthodes utilisées dans GEREPE. Ainsi le facteur d'émission du CH₄ (FE_{CH₄}) est donné par :

$$FE_{\text{CH}_4} = \text{BO}_{\text{CH}_4} \times \text{MCF} \times \rho_{\text{CH}_4}$$

avec BO_{CH₄} le potentiel maximum de méthane qui peut être produit par kg de MO excrétée (au bâtiment ici) en Nm³ de CH₄ /kg de MO, MCF le facteur de conversion du CH₄ (spécifique au type de sol) et ρ_{CH₄} la masse volumique du CH₄ égale à 0,67 kg CH₄/m³.

Il est considéré que, lors de la fermentation du lisier de porc en condition anaérobie, les pertes organiques conduisent à la production de CH₄ et de CO₂ avec un ratio volumique de 65/35 (F. Beline, communication personnelle). Le facteur d'émissions du CO₂ est donc calculé en fonction de celui du CH₄ :

$$FE_{\text{CO}_2} = 35/65 \times \text{BO}_{\text{CH}_4} \times \text{MCF} \times \rho_{\text{CO}_2}$$

avec ρ_{CO₂} la masse volumique du CO₂ égale à 1,83 kg CO₂/m³.

Les pertes de MS sont calculées en fonction des teneurs en N et MO des excréta produits et de ces facteurs d'émissions :

$$FE_{\text{MS}} = \text{N}/\text{MS}_{\text{excréta}} \times (\text{FE}_{\text{NH}_3} + \text{FE}_{\text{N}_2\text{O}} + \text{FE}_{\text{N}_2}) + \text{MO}/\text{MS}_{\text{excréta}} \times (\text{FE}_{\text{CH}_4} + \text{FE}_{\text{CO}_2})$$

avec N/MS_{excréta} et MO/MS_{excréta}, les teneurs de N et de MO par rapport à la MS totale des excréta (en %).

Finalement, les pertes de masse correspondent au produit du taux de MS de l'excréta avec FE_{MS}.

En sortie de *Salle*, un à plusieurs effluents sont obtenus et sont des entrées possibles pour une *Unité de Traitement*.

1.2.4. Traitement des effluents

La dernière classe utilisée dans ce modèle est la classe *Chaîne de traitement*. En effet, plusieurs *chaînes de traitement* peuvent être mises en place au sein d'un élevage. Une *chaîne de traitement* est composée de plusieurs *unités de traitement*, qui vont être reliées soit à une *salle*, soit à une *unité de traitement* précédente (Figure 1). Ainsi, une *unité de traitement* peut avoir en entrée un à plusieurs effluents et en sortie un à deux produits de traitement (cas des séparations de phases).

Différents types de traitement sont définis dans ce modèle : stockage, séparation de phases, compostage et digestion anaérobie. De même que pour le bâtiment, des facteurs de transformation, définis selon les mêmes méthodes expliquées précédemment, sont appliqués aux différents paramètres des entrées de l'unité de traitement, afin d'effectuer un bilan de

masse (Tableau 1). Les pertes de masse, de MS, de MO et de N correspondent aux quantités de gaz émises lors des différents traitements, y compris les pertes en eau lors du compostage et de la digestion anaérobie. Pour les traitements séparatifs, une deuxième phase est produite, ces facteurs correspondent donc à des facteurs de répartition entre les deux phases générées.

C'est le cas dans notre exemple avec le raclage en V, traitement séparatif intervenant au bâtiment (Tableau 1). Ces facteurs sont tirés d'une étude de Loussouarn *et al.* (2014).

À la fin des différentes chaînes de traitement, les quantités et teneurs en éléments des effluents épandables sont obtenues.

Tableau 1 – Facteurs de transformation et de répartition des différents éléments des entrées du bâtiment ou des traitements

Type de traitement	Nom	Coefficients appliqués sur :							
		Masse	MS	MO	N	P	K	Cu	Zn
Bâtiment (facteurs de transformation)									
Caillebotis Intégral	Lisier	0,98	0,82	0,85	0,72	1	1	1	1
Litière	Fumier	0,98	0,82	0,85	0,68	1	1	1	1
Stockage (facteurs de transformation)									
Stockage en fosse non couvert	Lisier stocké	0,99	0,89	0,88	0,86	1	1	1	1
Stockage en fosse couvert	Lisier stocké	0,99	0,94	0,92	0,97	1	1	1	1
Stockage en fumière	Fumier stocké	0,99	0,85	0,88	0,50	1	1	1	1
Séparation de phases (facteurs de répartition)									
Raclage en V	Solide	0,37	0,88	0,91	0,42	0,88	0,48	0,93	0,93
	Phase Liquide	0,63	0,12	0,09	0,58	0,12	0,52	0,07	0,07
Traitements biologiques (facteurs de transformation)									
Mono-digestion anaérobie mésophile de phase solide	Digestat	0,93	0,73	0,59	1	1	1	1	1
Compostage de lisier sur paille	Compost	0,32	0,69	0,59	0,57	1	1	1	1

2. SIMULATIONS

Le modèle a été utilisé pour simuler l'effet de la teneur alimentaire de Cu et Zn et de différents traitements sur leurs teneurs dans les effluents produits. Ainsi, un type d'élevage, composé de plusieurs chaînes de traitement, a été défini. Quatre niveaux différents de Cu et Zn dans l'alimentation sont simulés (Tableau 2).

2.1. Description de l'élevage simulé

La figure 2 représente les différents types d'animaux, de bâtiments et de traitements présents sur l'élevage simulé. Ainsi cet élevage est composé de quatre bâtiments : un premier bâtiment avec des animaux en post-sevrage (PS), deux bâtiments

avec des porcs en engraissement sur caillebotis et un dernier bâtiment avec des porcs en engraissement sur litière. Les caractéristiques des animaux (PVI, PVF, IC, TMP) sont ceux issus du RMT Elevage et Environnement (Dourmad *et al.*, 2015), il en est de même pour la quantité de paille ajoutée par porc dans le bâtiment sur litière (60 kg/porc). Le bâtiment 1 (Post-sevrage) est composé de deux salles et accueille 250 nouveaux porcelets toutes les trois semaines pour 6 semaines de PS, ce qui correspond à 8,7 rotations par salle dans l'année simulée. Les bâtiments 2 et 3 comportent également deux salles d'une capacité de 250 porcs pour 14 semaines d'engraissement, ce qui correspond à 3,5 rotations par salle sur l'année simulée. Le bâtiment 4 ne contient qu'une seule salle, avec une rotation annuelle de 3,4 bandes.

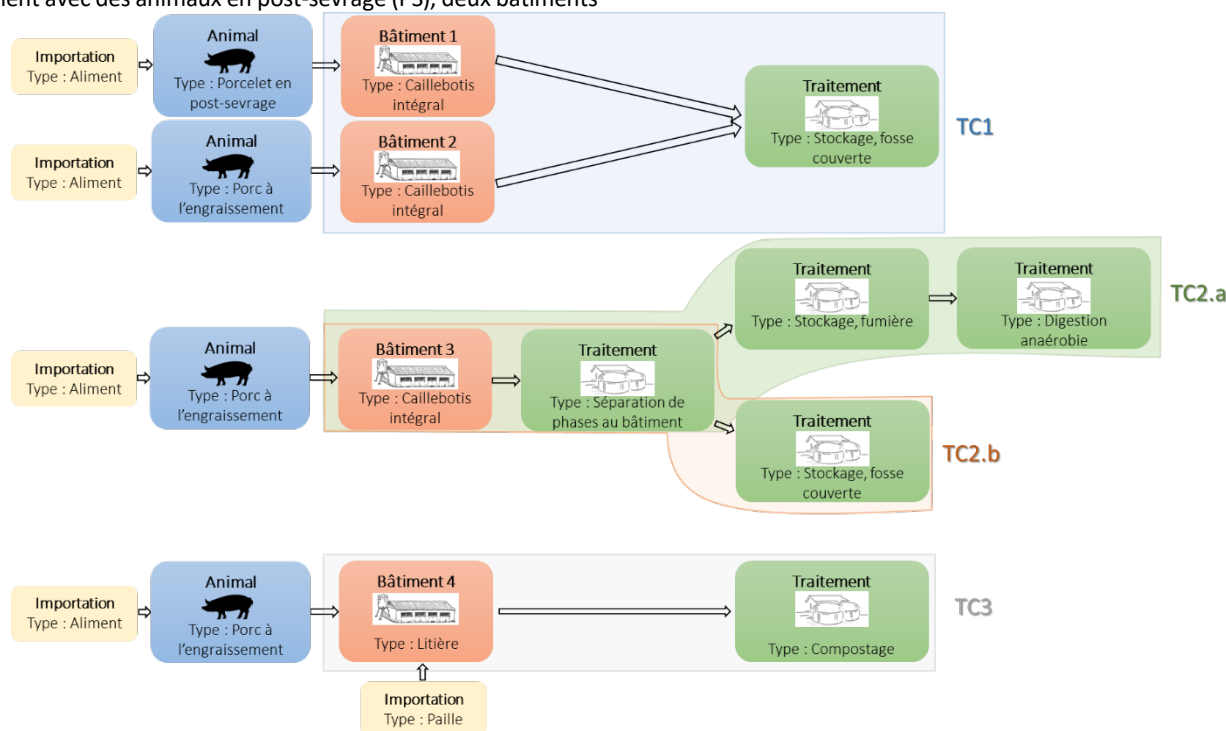


Figure 2 – Schéma de l'élevage simulé

TC1 à 3 : chaînes de traitements 1 à 3

Les bâtiments 1 et 2 déversent leurs effluents dans une première fosse couverte, ce qui correspond à la première chaîne de traitement (TC1). Le bâtiment 3 est équipé d'un traitement séparatif au bâtiment et produit donc deux effluents : une phase liquide, qui va être stockée dans une seconde fosse couverte (TC2b) et une phase solide, qui va être stockée dans une fumière avant digestion anaérobie (TC2a). Finalement, le fumier produit dans le bâtiment 4 est composté (TC3).

2.2. Description des simulations et objectifs à atteindre

Pour illustrer les potentialités du modèle, nous avons réalisé des simulations visant à mesurer les effets des baisses de teneurs de Cu et Zn dans les aliments pour porcs sur les teneurs en Cu et Zn des effluents bruts et après traitement. Le second objectif est de déterminer la capacité des stratégies de réduction dans l'aliment et de gestion des effluents proposées à respecter les seuils autorisés pour la commercialisation des amendements organiques en Europe (300 et 800 mg Cu et Zn /kg MS pour le règlement (UE) N°2019/1009 sur les engrais organiques ; 100 et 300 mg Cu et Zn /kg MS pour l'Ecolabel).

Le premier régime testé correspond aux teneurs maximales autorisées dans l'alimentation des porcelets en PS et des porcs en engraissement en Europe en 2003. Les régimes 2 et 3 correspondent respectivement aux teneurs fixées par les réglementations de 2003 et celles actuelles de 2016 et 2018 (Réglementation (UE) N°2016/1095 ; Règlement (UE)

N°2018/1039). Les teneurs du dernier traitement (4) sont des propositions de perspectives de réduction du Cu et du Zn dans l'aliment.

Tableau 2 – Teneurs en Cu et Zn des aliments pour les quatre scénarios évalués (1 à 4)

	Règlement	Cu, mg/kg			Zn, mg/kg		
		PS 1	PS 2	Eng.	PS 1	PS 2	Eng.
S1	Avant 2003	170	170	120	250	250	250
S2	2003	170	170	25	150	150	150
S3	Actuelles	150	100	25	150	150	120
S4	Perspectives	100	80	15	100	100	80

PS 1 : post-sevrage jusqu'à 4 semaines ; PS 2 : post-sevrage jusqu'à 8 semaines ; Eng. : engraissement

Les teneurs en N, P, K des aliments sont les mêmes pour tous les régimes et correspondent aux teneurs retenues par le RMT Elevage et Environnement selon une conduite alimentaire en biphasé (Dourmad *et al.*, 2015).

2.3. Résultats et discussion

Les principaux résultats issus de la simulation sont représentés sur la figure 3. Les teneurs en Cu et Zn dans les différents effluents produits en sortie des quatre chaînes de traitement simulés sont décrits et comparés aux réglementations sur la teneur en Cu et Zn des engrais organiques.

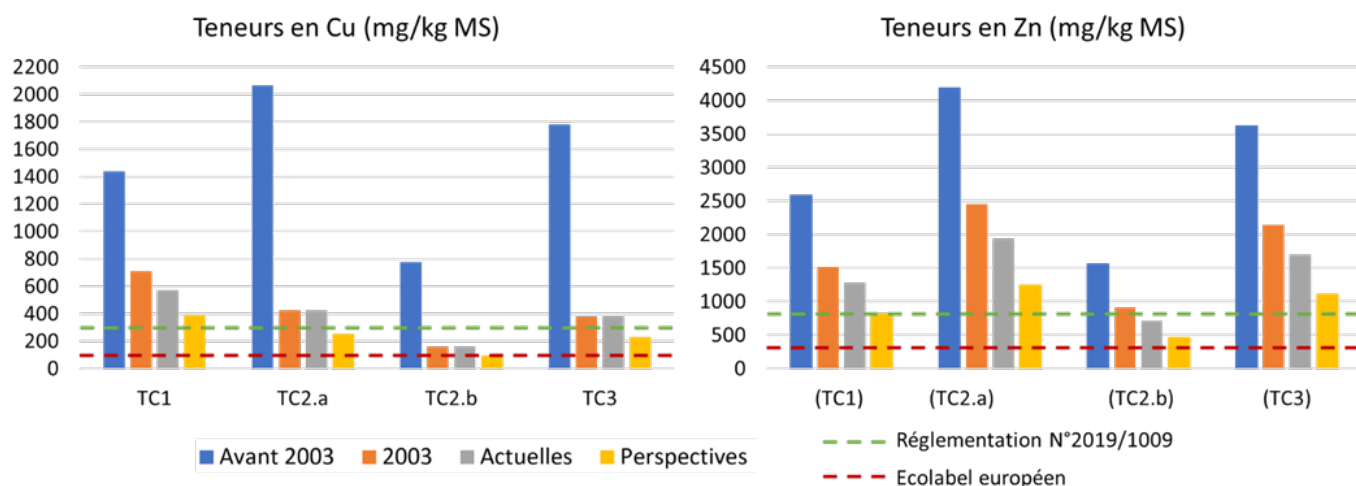


Figure 3 – Teneurs en Cu et en Zn des effluents finaux produits par les différentes chaînes de traitement présentes sur l'élevage simulé en fonction de l'évolution de la réglementation européenne

TC1 : mélange de lisier stocké issu des bâtiments 1 et 2 (post-sevrage + Engraissement), TC2.a : digestat obtenu après digestion anaérobie d'une phase solide issue du raclage en V des déjections du bâtiment 3, TC2.b : phase liquide stockée issue du raclage en V des déjections du bâtiment 3 (engraissement), TC3 : compost issu du compostage du fumier du bâtiment 4 (Engraissement).

Des valeurs de lisier mélangé (TC1, mélange post-sevrage et engraissement) d'environ 580 et 1300 mg Cu et Zn /kg MS sont obtenues pour le scénario alimentaire respectant la réglementation actuelle (S3, tableau 2). Pour ces mêmes teneurs de Cu et Zn dans l'aliment (S3 tableau 2)), Levasseur et Texier (2001) obtenaient des lisiers de porcelets d'environ 750 et 1800 mg Cu et Zn /kg MS. Cette même étude donnait des valeurs de lisiers de porcs à l'engraissement, nourris avec des teneurs réglementaires de Cu et Zn (S3, tableau 2) avec des teneurs égales à environ 180 et 1300 mg Cu et Zn /kg MS. D'autres études donnent ces mêmes valeurs (Van Heugten *et al.*, 2014 ; Liu *et al.*, 2016). Des études donnent également des ordres de grandeur pour des teneurs en Cu et Zn de digestat de

lisiers et de compost proches de nos résultats de simulation (Hsu *et al.*, 2001 ; Marcato *et al.*, 2007).

Les simulations montrent que l'évolution de la réglementation européenne et des teneurs maximales autorisées de Cu et Zn dans l'aliment depuis 2003 a permis une diminution théorique de 80 et 50% des teneurs en Cu et Zn dans les effluents produits. De même, les perspectives testées de réduction plus poussée du Cu et du Zn dans l'alimentation amènent à une nouvelle réduction espérée de 40 et 30 % de ces teneurs par rapport aux valeurs de la réglementation actuelle.

D'après nos résultats, les teneurs réglementaires actuelles de Cu et Zn dans les aliments ne sont pas assez restrictives pour respecter les teneurs maximales autorisées en Cu et Zn dans les

engrais organiques (321 et 960 mg Cu et Zn /kg MS dans les excréta moyens, 425 et 1934 mg Cu et Zn /kg MS dans les digestats, 378 et 1698 mg Cu et Zn /kg MS dans les composts). La chaîne de traitement TC2 permet toutefois de produire une phase liquide stockée qui respecte ces teneurs autorisées (160 et 717 mg Cu et Zn/kg MS). Les perspectives proposées, quant à elle, permettent d'obtenir un digestat issu de phase solide de porc en engraissement et un compost de fumier de porc en engraissement qui respectent les teneurs en Cu autorisées (252 et 230 mg/kg MS) mais ne sont pas suffisantes pour le Zn (1242 et 1108 mg/kg MS).

Aucun de ces produits ne respecte les teneurs fixées par l'Ecolabel, qui est le plus strict. Toutefois, la dilution générée par l'apport de co-substrat pour certains traitements peut permettre de satisfaire ces contraintes.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Le modèle développé dans le cadre de ce travail permet de prédire de façon cohérente les teneurs moyennes en Cu et Zn des excréta d'élevage et des effluents produits après traitement. En effet, les teneurs obtenues sont proches de celles mesurées dans d'autres études, mais nécessiterait une validation du modèle avec des données issues du terrain.

Avant utilisation pour du conseil, il devra faire l'objet d'une évaluation en comparant ses estimations avec d'autres données expérimentales.

Ce modèle pourra ensuite être utilisé en rétro-ingénierie afin de déterminer des teneurs de Cu et Zn maximales dans les aliments permettant d'atteindre des objectifs spécifiques de teneurs dans les effluents et leurs produits après traitement.

Une perspective de travail pourrait être aussi de prédire les différentes formes de Cu et Zn tout au long de la chaîne de traitement pour connaître plus précisément la mobilité et la disponibilité de ces éléments dans les sols et donc leur niveau de toxicité.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ADEME pour le soutien financier apporté à ce travail dans le cadre de l'appel à projet GRAINE 2021 et du projet RECUIZ « Optimisation du recyclage du cuivre et zinc, depuis leur apport en alimentation animale jusqu'à leur retour au sol ». Ce travail a été réalisé, dans le cadre d'une convention de thèse CIFRE, gérée par l'Association Nationale de la Recherche Technique (ANRT) et établie entre INRAE et la société Animine (Annecy, 74).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Belon E., Boisson M., Deportes I.Z., Eglin T.K., Feix I., Bispo A.O., Galsomies L., Leblond S., Guellier C.R., 2012. An inventory of trace elements inputs to french agricultural soils. *Science of The Total Environment*, 439, 87–95.
- Dourmad J.-Y., Pomar C., Massé D., 2002. Modélisation du flux de composés à risque pour l'environnement dans un élevage porcin. *Journées de la Recherche Porcine*, 34, 183–194.
- Dourmad J.-Y., Levasseur P., Daumer M., Hassouna M., Landrain B., Lemaire N., Loussouarn A., Salaün Y., Espagnol S., 2015. Évaluation des rejets d'azote, phosphore, potassium, cuivre et zinc des porcs. *RMT Elevages et Environnement*, Paris, France, 26 p.
- GEREPE v3.9, Gestion Electronique du Registre des Emissions Polluantes, 2018, <https://www.citepa.org/fr/formation-gerepe/>
- Gis Sol. 2011. L'état des sols de France. Groupement d'intérêt scientifique sur les sols, 188 p
- Gourlez E., Béline F., Dourmad J.-Y., Monteiro A., de Quelen F., 2022. Rôle et impact environnemental du cuivre et du zinc en élevage porcin : de l'alimentation au retour au sol des effluents. *INRAE Productions Animales*, 35, 91–108.
- Hsu J.H., Lo S.L., 2001. Effect of composting on characterization and leaching of copper, manganese, and zinc from swine manure. *Environmental Pollution*, 114, 119–127.
- Jondreville C., Revy P.S., Dourmad J.-Y., Nys Y., Hillion S., Pontrucher F., Gonzalez J., Soler J., Lizardo R., Tibau J., 2004. Influence du sexe et du génotype sur la rétention corporelle de calcium, phosphore, potassium, sodium, magnésium, fer, zinc et cuivre chez le porc de 25 à 135 kg de poids vif. *Journées de la Recherche Porcine*, 36, 17–24.
- Levasseur P., Texier C., 2001. Teneurs en éléments-trace métalliques des aliments et des lisiers de porcs à l'engrais, de truies et de porcelets. *Journées de la Recherche Porcine*, 33, 57–62.
- Liu B., Xiong P., Chen N., He J., Lin G., Xue Y., Li W., Yu D., 2016. Effects of replacing of inorganic trace minerals by organically bound trace minerals on growth performance, tissue mineral status, and fecal mineral excretion in commercial grower-finisher pigs. *Biological Trace Element Research*, 173 (2), 316–324.
- López Alonso M., Benedito J.L., Miranda M., Castillo C., Hernández J., Shore R.F., 2000. The effect of pig farming on copper and zinc accumulation in Cattle in Galicia (North-Western Spain). *The Veterinary Journal*, 160, 256–266.
- Loussouarn A., Lagadec S., Robin P., Hassouna M., 2014. Raclage en « V » : bilan environnemental et zootechnique lors de sept années de fonctionnement à Guernévez. *Journées de la Recherche Porcine*, 46, 199–204.
- Männer K., 2008. Bioavailability of trace minerals sources in swine. In: P. Schlegel, S. Durosoy, A.W. Jongbloed (Eds), *Trace elements in animal production systems*, 177 – 186. Wageningen Academic Publishers, Wageningen, The Netherlands.
- Marcatto C.E., Pinelli E., Pinelli E., Cecchi M., Winterton P., Guirese M., 2009. Bioavailability of Cu and Zn in raw and anaerobically digested pig slurry. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 72, 1538–1544.
- McGrath M.C., 1981. Implications of applying copper rich pig slurry to grassland; effects on plant and soil. In: P. L'Hermite, J. Dehandschutter (Eds), *Copper in animal wastes and sewage sludge*, 144 – 153. Proc. EEC Workshop, INRA Publisher, Bordeaux, France.
- Règlement (UE) N°2016/1095 du 6 juillet 2016, https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_impl/2016/1095/oj
- Règlement (UE) N°2018/1039 du 23 juillet 2018, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1039&from=EN>
- Règlement (UE) N°2019/1009 du 5 juin 2019, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32019R1009>
- Rigolot C., Espagnol S., Pomar C., Dourmad J.-Y., 2010a. Modelling of manure production by pigs and NH₃, N₂O and CH₄ emissions. Part I: animal excretion and enteric CH₄, effect of feeding and performance. *Animal*, 4:8, 1401–1412.
- Rigolot C., Espagnol S., Pomar C., Dourmad J.-Y., 2010b. Modelling of manure production by pigs and NH₃, N₂O and CH₄ emissions. Part II: effect of animal housing, manure storage and treatment practices. *Animal*, 4:8, 1413–1424.
- Van Heugten E., O'Quinn P.R., Funderburke D.W., Flowers W.L., Spears J.W., 2004. Growth performance, carcass characteristics, plasma minerals, and fecal mineral excretion in grower finisher swine fed diets with levels of trace minerals lower than common industry levels. *Journal of Swine Health and Production*, 12(5), 237–241.