

Faculté des bioingénieurs

# Pertes en éléments minéraux lors du stockage de fumier de volailles au champ.

Auteur : Simon MASCART

Promoteur(s) : Prof Richard LAMBERT

Marc DE TOFFOLI

Lecteur(s) : Christel Houtet

Thibaut CUGNON

Année académique 2021-2022

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de  
Bioingénieur : sciences agronomiques (pour les BIRA)

## REMERCIEMENTS

---

*Tout d'abord, je tiens à remercier mes promoteurs, Richard Lambert et Marc De Toffoli pour l'accompagnement et le suivi lors de la réalisation de ce mémoire. Le sujet proposé m'a permis de découvrir une facette de l'agriculture que je sous-estimais avant de m'y intéresser.*

*Un merci tout particulier à Benoît Vandevoord de m'avoir ouvert les portes de sa ferme. Et de m'avoir accordé plusieurs heures de son temps précieux pour mettre en place l'expérience. Merci également aux parents de Benoît pour le ravitaillement et le soutien pendant le travail au champ.*

*Merci au personnel du Centre de Michamps, particulièrement Bertrand Wavreille, pour le suivi durant les manipulations au laboratoire ainsi que pour la disponibilité durant l'écriture de mon rapport.*

*Je remercie également Olivier Imbrecht d'avoir pris de son temps pour m'emmener rencontrer les agriculteurs susceptibles de vouloir accueillir ce mémoire. Et également d'avoir joué le rôle de soutien technique lorsque j'avais besoin de matériel spécifique.*

*Merci au CIPF et plus particulièrement à Alexis Delautre pour les conseils et le prêt de la sonde thermique.*

*Un immense merci à mes parents, mon frère et Dima de m'avoir soutenu et aidé. Que ce soit moralement ou bien sur le terrain !*

*Enfin, merci à mes cokoteurs d'avoir subi sans broncher mes odeurs de fumier à toute heure de la journée ! Merci pour toutes ces nocturnes productives lors de l'écriture du mémoire ! Et un merci tout particulier à Noé Laloux d'avoir été mon pythoneur de référence et mon concessionnaire FIAT attitré.*

## TABLE DES MATIERES

---

1	Contexte et problématique.....	1
2	Synthèse bibliographique .....	3
2.1	Les engrais de ferme.....	3
2.1.1	Détermination des engrais de ferme .....	3
2.1.2	Propriétés des engrais de ferme .....	4
2.1.3	Composition des engrais de ferme .....	5
2.1.4	Facteurs influençant la composition des engrais de ferme .....	6
2.2	Les fumiers de volailles.....	8
2.2.1	Particularité des fumiers de volailles .....	8
2.2.2	Particularité de l'acide urique .....	9
2.2.3	Itinéraire de gestion à l'échelle de la ferme et pertes potentielles en nutriments 10	
2.3	Stockage du fumier de volailles au champ .....	12
2.3.1	Estimation des pertes en EM lors du stockage au champ .....	12
2.3.2	Méthodes de stockage pour limiter les pertes en EM .....	14
2.3.3	Impacts sanitaires et environnementaux.....	16
2.4	Cadre légal .....	17
2.4.1	La Directive sur les nitrates .....	17
2.4.2	PGDA.....	17
3	Objectif de l'étude .....	19
4	Matériel et méthode.....	21
4.1	Contexte de l'étude .....	21
4.2	Présentation du site d'étude .....	21
4.3	Déroulement de l'expérimentation.....	22
4.4	Caractérisation du fumier de départ .....	22
4.4.1	Mesure de la densité du fumier de départ .....	22
4.4.2	Méthode d'échantillonnage et de conservation.....	23
4.4.3	Méthode d'analyse de la composition du fumier au laboratoire .....	23
4.5	Dispositif expérimental de récolte de jus au champ .....	26
4.5.1	Fonctionnement du dispositif .....	26
4.5.2	Particularité du positionnement des tôles ondulées sous les tas.....	27
4.5.3	Étapes de mise en place des dispositifs .....	27

4.6	Mise en place des couverts .....	30
4.6.1	Couvert géotextile (CV) .....	30
4.6.2	Couvert végétal (CV).....	31
4.6.3	Témoin (SC) .....	33
4.7	Modélisation et cubage des tas.....	33
4.8	Caractérisation des jus de lessivage et de ruissellement .....	34
4.8.1	Méthode d'échantillonnage des jus et conservation.....	34
4.8.2	Analyses des jus au laboratoire.....	35
4.9	Suivi des précipitations.....	35
4.10	Suivi de la température des tas .....	36
4.11	Suivi du front d'humectation dans les tas .....	36
4.12	Caractérisation du fumier après stockage.....	37
4.12.1	Méthode d'échantillonnage et conservation.....	37
4.12.2	Méthode d'analyse de la composition du fumier au laboratoire .....	37
4.13	Méthode de caractérisation des pertes .....	37
4.13.1	Analyse de la composition en EM initiale du fumier .....	37
4.13.2	Analyse du lessivage et du ruissellement .....	38
4.13.3	Analyse de la composition en EM finale du fumier .....	39
4.13.4	Calculs des bilans de masse relatifs aux 3 traitements.....	39
5	Résultats.....	41
5.1	Propriétés physiques et chimiques du fumier avant le stockage.....	41
5.2	Propriétés physiques et chimiques du fumier après le stockage.....	42
5.2.1	Évolution du taux de matière sèche des tas .....	42
5.2.2	Bilan de masse.....	43
5.2.3	Propriétés chimiques du fumier après le stockage .....	44
5.3	Évolution de la température des tas au cours du stockage .....	46
5.4	Conditions climatiques pendant le stockage.....	47
5.5	Évolution du front d'humectation pendant la période de stockage.....	48
5.6	Analyse du lessivage et du ruissellement.....	49
5.6.1	Volumes de jus récoltés .....	49
5.6.2	Quantification des pertes en EM.....	50
5.6.3	Évolution des pertes au cours du stockage.....	53
5.7	Caractérisation des pertes en NT .....	54

6	Discussion.....	57
6.1	Propriétés physiques et chimiques du fumier avant le stockage.....	57
6.2	Propriétés physiques et chimiques du fumier après le stockage.....	57
6.2.1	Teneurs en EM du fumier après le stockage.....	57
6.2.2	Teneurs en EM différentes selon les couches des tas .....	58
6.2.3	Évolution du taux de MS des tas au cours du stockage .....	59
6.2.4	Évolution de la température des tas au cours du stockage.....	60
6.3	Analyse du lessivage et ruissellement .....	61
6.3.1	Impact des conditions climatiques sur le lessivage et le ruissellement.....	61
6.3.2	Évolution des pertes en EM dans les jus récoltés .....	61
6.3.3	Quantité d'EM perdus lors du stockage.....	62
6.3.4	Sous-estimation des quantités EM perdus par lessivage et ruissellement.....	63
6.4	Caractérisation des pertes en N .....	65
6.4.1	Volatilisation de N .....	65
6.4.2	Impact de la méthode de stockage sur la volatilisation de N .....	65
6.4.3	Rapport entre lessivage, ruissellement et volatilisation de N .....	65
6.5	Évaluation du risque de pollution de l'eau par les nitrates lors du stockage des fumiers de volailles au champ .....	66
6.6	Perspectives liées aux résultats.....	68
6.7	Limites de l'étude .....	70
7	Conclusion.....	71
8	Bibliographie .....	72

## TABLE DE FIGURES

---

Figure 1 : Pourcentage des fractions azotées dans différents effluents d'élevage (Renée Teuki, Chambre d'agriculture de la Somme, Les effluents d'élevage : mieux les connaître pour mieux les valoriser) .....	7
Figure 2 : Processus de conversion de l'acide urique en urée et $\text{NH}_3$ .....	9
Figure 3 : Principales sources de pertes d'azote dans l'environnement lors du stockage de fumier au champ .....	13
Figure 4 : Carte illustrant la localisation de la zone de dépôt de fumier étudié.....	21
Figure 5 : Illustration des 9 échantillons de fumier frais réalisés avant le stockage du fumier .....	23
Figure 6 : Étuve pour le séchage des échantillons à 60°C.....	24
Figure 7 : Broyeur à couteau à volume conséquent .....	24
Figure 8 : Méthode Kjeldahl : Digestion de l'échantillon dans l'acide sulfurique.....	25
Figure 9 : Méthode Kjeldahl : distillation avec l'appareil de distillation Büchi K-355.....	25
Figure 10 : Dispositif de récolte des jus de lessivage et de ruissellement.....	26
Figure 11 : Positionnement optimal de la tôle de récupération sous le tas .....	27
Figure 12 : Courbure optimale de la tôle de récupération sous le tas .....	27
Figure 13 : Positionnement des tôles de récupération par enfoncement à l'aide du chargeur du Merlot.....	28
Figure 14 : Étapes de mise en place des dispositifs de récupération des jus de lessivage et de ruissellement sous les tas de fumier .....	29
Figure 15 : Dispositif expérimental pour le fumier stocké sous le CG .....	31
Figure 16 : Court-circuitage du ruissellement provenant du géotextile à l'aide d'une gouttière en PVC fixée au géotextile.....	31
Figure 17 : Dispositif expérimental pour le fumier stocké sous le CV .....	32
Figure 18 : Dispositif expérimental pour le fumier stocké SC.....	33
Figure 19 : Schéma illustrant les 4 mesures réalisées sur le terrain pour la modélisation des tas .....	33
Figure 20 : Photo illustrant l'échantillonnage des jus de lessivage et de ruissellement .....	35
Figure 21 : Thermomètre numérique et sonde de 2m .....	36
Figure 22 : Méthode d'échantillonnage de fumier selon Lambert et Cugnion 2015.....	37
Figure 23 : Schéma illustrant la méthode de calcul des pertes moyennes en EM pour chaque traitement .....	38
Figure 24 : Modélisation des 3 couches dans les tas de fumier .....	39
Figure 25 : Teneurs en EM présents dans le fumier avant le stockage [Kg/Tonne de produit sec] .....	41
Figure 26 : Schéma représentant le fractionnement vertical des tas en 3 couches distinctes	42
Figure 27 : Évolution de la température à 1m de profondeur pendant la période de stockage du fumier .....	46

Figure 28 : Précipitations mensuelles enregistrées à Louvain-la-Neuve/Baisy-Thy pendant la période de stockage du fumier comparées aux précipitations mensuelles moyennes à Uccle entre 1991 et 2020 (Climate-data.org) .....	47
Figure 29 : Précipitations journalières pendant la période de stockage .....	47
Figure 30 : Cumul des précipitations pendant la période de stockage.....	48
Figure 31 : Évolution du front d'humectation des tas au cours de la période de stockage parallèlement au cumul de précipitations .....	48
Figure 32 : Évolution du lessivage et du ruissellement comparé au cumul de précipitation enregistré au cours de la période de stockage du fumier. ....	50
Figure 33 : Comparaison des pertes moyennes en EM pour les différentes méthodes de stockage [Kg/Tonnes de MS].....	52
Figure 34 : Évolution des pertes en EM au cours du stockage pour le CV.....	53
Figure 35 : Évolution des pertes en EM au cours du stockage pour le SC .....	53
Figure 36 : Pertes en NT au cours de la période de stockage du fumier .....	55
Figure 37 : Photo illustrant le CV qui a poussé de manière hétérogène sur le tas malgré un sursemis.....	59
Figure 38 : Photo illustrant l'état du CG à la fin de la période de stockage du fumier .....	68
Figure 39 : Photo illustrant le CG replié après la période de stockage du fumier .....	68

## LISTE DES TABLEAUX

---

Tableau 1 : Composition moyenne des engrais de ferme (Requasud) .....	6
Tableau 2 : Propriétés physiques et chimiques du fumier avant le stockage.....	41
Tableau 3 : Évolution du taux de matière sèche des tas au cours du stockage.....	42
Tableau 4 : Tableau récapitulatif du calcul de bilan de masse par rapport au EM de référence (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ) .....	43
Tableau 5 : Tableau récapitulatif des propriétés chimiques du fumier après le stockage .....	44
Tableau 6 : Comparaisons des teneurs en NT dans les 3 couches des tas .....	44
Tableau 7 : Comparaison des teneurs en K <sub>2</sub> O dans les 3 couches des tas .....	45
Tableau 8 : Comparaison des teneurs en P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> dans les 3 couches des tas .....	45
Tableau 9 : Volumes de jus récoltés en fonction de la méthode de stockage .....	49
Tableau 10 : Tableau récapitulatif des pertes par lessivage et ruissellement pour les principaux EM en fonction de la méthode de stockage.....	50
Tableau 11 : Tableau récapitulatif des différents types de pertes en NT .....	54
Tableau 12 : Tableau récapitulatif de la caractérisation des pertes en fonction des différents traitements.....	63

## LISTE DES ACRONYMES

---

**CG** Couvert géotextile

**CV** Couvert végétal

**EM** Éléments minéraux

**MAT** Matière azotée totale

**MO** Matière organique

**MS** Matière sèche

**N** Azote

**NT** Azote total

**OMS** Organisation mondiale de la santé

**PGDA** Programme de Gestion Durable de l'Azote

**PIR** Proche infrarouge

**SC** Sans couvert



# 1 CONTEXTE ET PROBLÉMATIQUE

---

Au cours des dernières décennies, la demande en produits alimentaires d'origine animale n'a fait qu'augmenter. C'est la conséquence notamment d'une population croissante, de l'augmentation des revenus des ménages et des changements de mode de vie (OCDE : Production agricole, 2020; Mottet and Tempio 2017).

Le nombre d'animaux dans les élevages augmente. Avec lui, la production d'effluents d'élevage. Dans l'Union européenne (UE-27) et au Royaume-Uni, l'élevage a généré plus de 1,4 milliard de tonnes d'effluents d'élevage par an au cours de la période 2016-2019 (Koninger et al., 2021). La gestion des engrais de ferme devient donc un enjeu central dans la limitation de l'impact de l'agriculture sur l'environnement. Particulièrement en ce qui concerne la qualité de l'eau et de l'air (Li et al. 2015; Sharpley et al. 2015; McDowell et al. 2016).

Dans les différents pays et régions, la spécialisation de l'agriculture entraîne une augmentation de la densité animale sur des surfaces agricoles réduites. Les régions d'élevage deviennent géographiquement déconnectées des zones de productions végétales (Kellogg et al. 2000; Jarvie et al. 2015). Ce qui entraîne des concentrations locales d'engrais de ferme, car le transport de ces produits vers les zones de production végétale reste difficile (Kleinman et al. 2015).

De nombreuses études montrent un potentiel excès en azote dans les fermes. Selon Hutson et al. (1998), dans certaines fermes, la quantité d'azote apporté via l'alimentation et la fertilisation est plus importante que la quantité d'azote produit et vendu. La concentration d'engrais de ferme dans certaines régions augmente les risques de pertes de nutriments par volatilisation, lessivage et ruissellement. Particulièrement lorsque la gestion de ces produits n'est pas optimale.

Dans ce mémoire, nous abordons la problématique de pertes de nutriments dans le contexte de la gestion des fumiers de volailles en Belgique. Le secteur avicole belge est en plein développement. Il répond à une demande en viande dite blanche en constante augmentation depuis 1990. Ce type d'élevage est considéré comme un moyen de diversification facile à mettre en place pour les agriculteurs. En 2020, la population de volailles en Belgique était de 50 millions d'individus (Statbel, 2020). La répartition nationale est assez déséquilibrée avec 80% des animaux localisés en Flandre à proximité des ports d'importations. En 30 ans, le cheptel wallon a été multiplié par 8. Alors qu'en Flandre, le secteur n'a pas pu poursuivre sa croissance soutenue, car il a fait face à des enjeux environnementaux importants (SPW, Cheptel avicole 2022).

Avec l'augmentation importante de l'élevage, les préoccupations sociétales et environnementales sur les impacts des effluents d'élevage se multiplient. La plupart des pays développés mettent en place des régulations pour contrôler la conduite de ces co-produits d'élevage. En Europe, la Directive sur les nitrates et la Directive-cadre sur l'eau ont été mises en place. Les différents pôles de recherche agronomique sont donc sollicités pour mettre au point ces directives.



## 2 SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

---

### 2.1 LES ENGRAIS DE FERME

#### 2.1.1 Détermination des engrais de ferme

##### *Définition européenne*

Dans la législation européenne, il n'y a pas de définition uniformisée pour les engrais de ferme. Actuellement en Europe, les engrais de ferme ne sont pas réglementés par une directive ou une réglementation unique. Il existe diverses réglementations, directives et lois nationales des États membres qui déterminent la gestion et la qualité des engrais de ferme.

- La réglementation qui régit les sous-produits animaux (SPA) définit le terme fumier comme : tout excrément et/ou urine d'animaux d'élevage autre que les poissons d'élevage, avec ou sans litière (Commission européenne, 1069/2009).
- La Directive Nitrates définit les fumiers d'origines de ferme d'élevage comme : tous déchets excrétés par le bétail : ou un mélange de litière et de déchets excrétés par le bétail, même sous forme transformée (Directive européenne, 91/676/EEC).

Selon Eurostat (2021), le fumier est considéré comme solide lorsque la masse sèche dépasse 20%. Si la masse sèche est comprise entre 4% et 20%, on parle de lisier mou. Tandis que le fumier est considéré comme liquide lorsque la masse sèche est inférieure à 4%.

##### *Définition wallonne*

Selon l'arrêté du Gouvernement wallon relatif à la gestion durable de l'azote en agriculture (13 juin 2014) : le terme « effluent d'élevage » définit les déjections d'animaux ou les mélanges d'origine agricole, 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, l'arrêté distingue :

- Le fumier : mélange solide de litière, d'urines et d'excréments d'animaux, à l'exclusion des effluents de volaille
- Le lisier : mélange de fèces et d'urines, sous forme liquide ou pâteuse y compris la phase liquide obtenue par une opération de séparation des composantes du lisier
- Le purin : les urines seules, diluées ou non, s'écoulant des lieux d'hébergement des animaux ou de la fumière
- Les fumiers de volaille : les déjections de volailles mêlées à de la litière (notamment des copeaux ou de la paille)
- Les fientes de volaille : les déjections pures de volailles
- Le compost de fumier : le fumier ayant subi un traitement mécanique d'aération 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 °

### 2.1.2 Propriétés des engrais de ferme

Les engrais de ferme sont des ressources de grande valeur en agriculture. De nombreuses recherches ont été faites sur leurs caractéristiques et démontrent qu'ils ont un impact sur les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.

#### *Propriétés fertilisantes*

Les engrais de ferme sont d'excellentes sources en nutriments primaires pour les plantes : azote, phosphore, potassium et autres nutriments secondaires importants pour le bon développement des plantes.

Les nutriments apportés par les engrais inorganiques sont majoritairement solubles dans l'eau et donc rapidement disponibles pour les plantes. Alors que les nutriments contenus dans les engrais organiques sont souvent moins disponibles. Cette propriété complique le dosage et l'application des engrais de ferme. Cependant, la libération progressive des nutriments dans le sol améliore l'utilisation des nutriments par les plantes et limite les pertes de nutriments vers les eaux de surface et souterraines (Risse et al., 2006).

De nombreuses études ont démontré que l'application d'engrais organiques permet d'atteindre des objectifs de rendements équivalents voir supérieurs à ceux obtenus lors de l'application d'engrais inorganiques (Motavalli et al., 1989; Xie and MacKenzie, 1986). L'utilisation d'engrais organiques peut également permettre d'améliorer la qualité des cultures. En effet, contrairement aux engrais inorganiques, les engrais organiques ont un impact sur les propriétés physiques du sol (Eck et al., 1990; Pimpini et al., 1992).

#### *Maintien du pH*

En raison de leur capacité tampon élevée, les engrais de ferme peuvent permettre de ralentir le taux de déclin de pH du sol (Cai et al., 2015). Certaines études suggèrent que le fumier solide peut augmenter le pH du sol via l'apport de potassium, sodium, magnésium, calcium et d'anions organiques (L'Herroux et al., 1997; Butterly et al., 2013; Whalen et al., 2000).

#### *Apport en matière organique*

De nombreuses études faites sur des conditions de sols variées montrent que l'application d'engrais de ferme permet d'augmenter la quantité de matière organique (MO) dans le sol (Nyakatawa et al., 2001). Cette augmentation est évidemment due à l'apport provenant des engrais de ferme eux-mêmes, mais également via l'augmentation de production de biomasse végétale (caulinaire et racinaire) et l'augmentation de production de résidus qui retournent vers le sol (Risse et al., 2006).

L'application d'engrais de ferme augmente considérablement le stock de carbone dans le sol (Liu et al., 2020) et permet de stabiliser le rapport C:N sur le long terme (Cui et al., 2018)

; Gong et al., 2009 ; Zhang et al., 2014). Ce qui selon Cui et al. (2018) favorise l'augmentation de la biodiversité génétique dans les sols.

Les nutriments apportés par les engrais de ferme stimulent l'activité enzymatique et microbienne de la faune du sol (Yang et al., 2019; Liang et al., 2014). Ces organismes rendent des services écosystémiques valorisés dans des pratiques agricoles plus durables.

#### *Amélioration de propriétés physiques du sol*

La majorité des effets de l'application d'engrais de ferme sur les propriétés physiques des sols sont dus à l'augmentation de la MO.

La présence de MO dans le sol permet la formation d'agrégats stables. Ces agrégats modifient la structure et les différentes propriétés physiques des sols (Haynes and Naidu, 1998). La capacité de rétention en eau est dès lors améliorée (Mosaddeghi et al., 2000). L'infiltration est favorisée par une porosité plus importante (Roberts, 2000). Et les risques d'érosion et de ruissellement sont réduits (Barthes et al., 1999).

#### *Réduction de la dépendance aux pesticides*

De nombreuses recherches ont pu déterminer que la biomasse et l'activité microbiologique dans le sol augmentent quand l'application d'engrais de ferme augmente (Lalande et al., 2000; Lazarovits, 2001). De la même manière, la présence de carbone organique sous différentes formes affecte la structure du réseau trophique du sol et modifie le cycle des nutriments (Estevez et al., 1996). Ainsi, lorsque la biomasse et la diversité microbienne du sol augmentent, les populations d'agents responsables de maladies de plantes et les parasites diminuent (Aryantha et al. 2000).

### 2.1.3 Composition des engrais de ferme

Les engrais de ferme sont composés d'excréments d'animaux et d'urine. Cependant, ils peuvent également contenir de la litière pour bétail, de l'eau et des aliments gaspillés.

Ils représentent une source importante de micro et macro-éléments intéressants pour les plantes. Le taux et la quantité d'application de ces produits est principalement déterminée par la composition en macronutriments primaires présents :

- Azote (N)
- Phosphore ( $P_2O_5$ )
- Potassium ( $K_2O$ )

Dans les engrais de ferme, N et  $P_2O_5$  sont présents majoritairement sous la forme organique. Ils ne sont donc pas considérés comme disponibles à 100% pour la plante. La forme organique doit donc être minéralisée pour qu'elle devienne disponible. En revanche, la disponibilité du  $K_2O$  dans les engrais organiques est considérée comme similaire à celle des engrais minéraux puisque la majorité du  $K_2O$  est sous la forme minérale (Motavalli et al.,

1989). En général, 90% à 100% du K<sub>2</sub>O est considéré comme disponible au cours de la première année d'application (Risse et al, 2006).

Les macronutriments secondaires que l'on retrouve dans les engrais de ferme sont :

- Calcium (CaO)
- Magnésium (MgO)
- Sodium (Na<sub>2</sub>O)

Les micronutriments d'intérêts que l'on retrouve dans les engrais de ferme sont :

- Fer (Fe)
- Cuivre (Cu)
- Zinc (Zn)
- Manganèse (Mn)

#### 2.1.4 Facteurs influençant la composition des engrais de ferme

La composition des engrais de ferme peut être très variable selon les exploitations. Il est conseillé aux agriculteurs de procéder à l'analyse de leurs engrais de ferme de manière à les valoriser au mieux.

Les principaux facteurs qui influencent la composition des engrais de ferme sont : le type de bétail, le stade de croissance, l'alimentation, les conditions de logement et les méthodes de gestion des engrais de ferme (Rotz, 2004).

Tableau 1 : Composition moyenne des engrais de ferme (Requasud)

Type d'engrais de ferme	MS (%)	MO (% MF)	Nt (g/Kg MF)	NH4 (g/Kg MF)	P2O5 (g/kg MF)	K2O (g/kg MF)	CaO (g/kg MF)	MgO (g/kg MF)	Na2O (g/kg MF)
<b>Bovins</b>									
Fumier composté	24	15,6	5,9	0,3	4,106	8,728	8,702	2,098	0,835
Fumier indéterminé	22,8	15,7	6,1	0,6	3,592	8,542	6,087	2,05	1,227
Fumier mou	19	14,4	5,2	0,8	2,614	6,758	4,699	1,432	0,571
Fumier sec	24	16,1	6,3	0,5	3,887	9,432	6,248	2,166	0,793
Lisier complet	7,2	5,3	3,5	1,6	1,373	3,864	1,934	0,936	0,672
Lisier phase liquide	6,1	3,8	3,8	1,6	1,436	4,465	1,82	0,978	1,045
Lisier phase solide	33,7	28,9	7,1	0,4	2,488	5,113	5,941	2,911	1,451
Purin	1,9	0,6	1,4	0,5	0,231	3,58	0,168	0,138	0,151
<b>Porcins</b>									
Fumier indéterminé	33,7	29	10,3	2,4	5,488	9,606	6,986	2,421	
Fumier mou	25,7	23	7,8	1	5,133	6,804	6,529	2,574	
Lisier complet	7,3	5,7	6,1	3,6	3,098	4,51	3,196	1,785	1,644
<b>Volailles*</b>									
Fientes humides	34,5	26,7	17,4	5,1	13,012	14,559	43,066	22,039	1,582
Fientes pré-séchées	53,9	38,1	24,4	5,3	19,294	16,539	48,913	7,887	3,766
Fientes séchées	64,7	45,5	27,2	5,3	22,904	19,125	51,447	8,828	3,649
Fumier composté	37,6	14,8	13,3	3,3	13,428	10,914	24,876	4,788	2,061
Fumier de volaille	49,3	37,9	23,9	4,1	14,549	16,906	20,738	6,563	2,945

#### Type de bétail, stade de croissance et alimentation

Les animaux d'élevages conservent une partie des nutriments qu'ils reçoivent dans leur alimentation à mesure qu'ils prennent du poids. Une partie des nutriments est également retenue dans le lait, les œufs et les autres produits d'élevage que nous valorisons.

Les éléments nutritifs qui ne sont pas retenus par l'animal ou exportés dans les produits d'élevage sont excrétés et se retrouvent dans les engrais de ferme. Selon Oenema and

Tamminga (2005), 55% à 90% de l'azote et du phosphore contenus dans l'alimentation des animaux sont excrétés. Cette valeur varie en fonction du type de bétail (*tableau 1*).

### Conditions de logement

La quantité et le type de litière utilisés déterminent si les engrais de ferme sont traités sous la forme liquide, semi-solide ou bien solide. Le *tableau 1* illustre l'influence de ce facteur.

On distingue 2 grands types d'engrais de ferme parmi les différentes formes d'effluents d'élevages repris dans le *tableau 1* :

1. **Les engrais de ferme à effet azote rapide** : 50% à 90% de l'azote contenu est disponible dans l'année.

Exemple : Lisiers de bovins, lisiers de porcs, fientes et fumiers de volailles (*figure 1*)

2. **Les engrais de ferme à effet azote lent** : 20% à 40% de l'azote contenu est disponible dans l'année.

Exemple : Fumiers de bovins et de porcs, compost (*figure 1*)

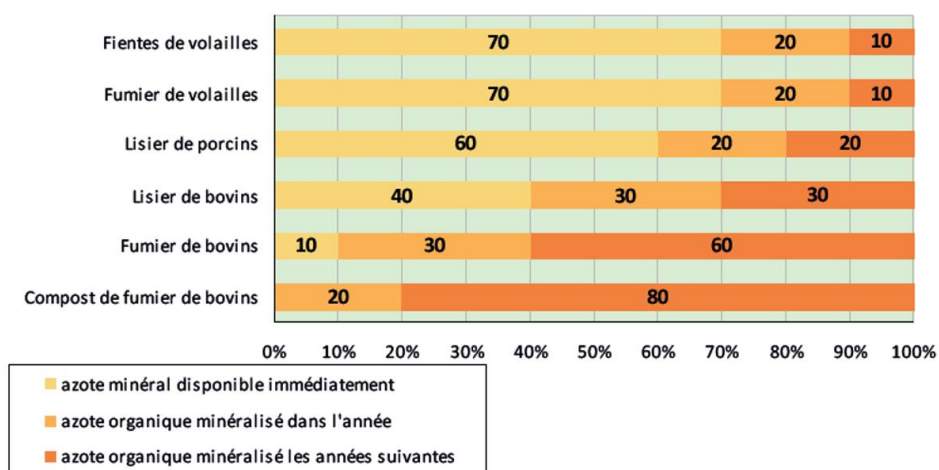


Figure 1 : Pourcentage des fractions azotées dans différents effluents d'élevage (Renée Teuki, Chambre d'agriculture de la Somme, Les effluents d'élevage : mieux les connaître pour mieux les valoriser)

La forme des effluents d'élevage influence donc bien la disponibilité en azote. Les fumiers ou composts de bovins sont une source en MO stable, car l'azote contenu se minéralise lentement. Les lisiers apportent de l'azote rapidement utilisable pour les plantes, mais peu de MO stable. Les effluents avicoles sont riches en éléments fertilisants (N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O) avec un taux de minéralisation rapide et une quantité de MO stable plus faible que les fumiers et composts de bovins.

L'azote se retrouve principalement sous 2 formes dans les engrais de ferme :

1. **L'azote ammoniacal (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)** : sous cette forme, l'azote peut être immédiatement utilisé par les plantes et rapidement transformé en nitrates (forme préférentielle d'absorption de l'azote pour les plantes).
2. **L'azote organique** : sous cette forme, l'azote n'est pas directement disponible pour les plantes, car il est contenu dans la MO. Il va donc devoir passer par plusieurs étapes de minéralisation pour être rendu disponible pour les plantes.

### *Méthodes de gestion des engrais de ferme*

Après l'excrétion et jusqu'à ce que les nutriments soient incorporés et fixés dans le sol, la composition des engrais de ferme évolue. Les concentrations évoluent plus ou moins rapidement en fonction des différentes phases de conduite des produits (dilution, méthode de stockage, traitement, méthode d'application) (Rotz 2004).

## 2.2 LES FUMIERS DE VOLAILLES

### 2.2.1 Particularité des fumiers de volailles

Les principaux éléments que l'on retrouve dans les fumiers de volailles sont les excréments, la litière, les plumes et une part des aliments qui est déjetée par les animaux (Kelley et al., 1996; Tasistro et al., 2004).

Selon la littérature et les données de composition moyenne des engrais de ferme Requasud (*tableau1*), les fumiers de volailles font partie des engrais de ferme les plus riches en nutriments N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO, MgO et en Soufre (Toor et al., 2006; Guo and Song, 2009). Le taux de matière sèche (MS) est élevé par rapport aux autres fumiers (40% à 65%). Et le niveau de pH particulièrement haut (8,3-8,7) (Tiquia & Tam 2000; Kelleher et al. 2002).

Comme pour les autres déchets organiques, il a été démontré que la teneur en humidité, le pH, le niveau de sel soluble et la composition élémentaire du fumier et de la litière de volaille varient considérablement en fonction des types de volaille, de l'alimentation et des compléments alimentaires, du type de litière et de la manipulation et du stockage.

### *L'azote*

Quatre formes d'azote sont identifiées dans le fumier de volaille : l'azote organique stable, l'azote organique labile, l'ammonium et le nitrate (Sims et Wolf, 1994 ; Sharpley et Smith, 1995 ; Diaz et al., 2008). L'azote organique stable est compris dans les constituants des plumes, les aliments renversés et non digérés et les matériaux de litière. L'azote organique labile est principalement composé d'acide urique et d'urée. L'acide urique dans le fumier frais est rapidement hydrolysé en urée par l'enzyme uricase, et l'urée est ensuite hydrolysée en ammonium par l'enzyme uréase. Le nitrate se forme lorsque les ions ammonium sont oxydés lors du compostage aérobie.

Les fumiers de volailles contiennent des concentrations importantes en azote organique (60%-80% de l'azote total) (Kelleher et al., 2002). Les principales sources d'azote sont l'acide urique (40%-60% de l'azote total), l'urée et des protéines non digérées (Viela et al., 2020). La proportion d'azote inorganique (ammonium, nitrates) est faible juste après l'excrétion. Cependant, selon les conditions environnementales, un grand pourcentage de l'azote organique (40%-90%) est converti en ammoniac pendant l'année suivant l'excrétion (Swelum et al., 2021).

### 2.2.2 Particularité de l'acide urique

En général, dans les fumiers, l'azote est sous la forme d'urée. Ce n'est pas le cas pour les fumiers de volailles. Les oiseaux excrètent l'azote sous forme de substances solides, plus précisément sous forme d'acide urique (Amanullah et al. 2007). Cette particularité est observable dans les excréments : une partie plus grande et foncée (fèces) et une partie plus petite et blanchâtre (l'acide urique). Ainsi les excréments solides et liquides sont excrétés ensemble. Et par conséquent, les fumiers de volailles sont plus riches en azote que les excréments de porcs et de bovins (Swelum et al., 2021).

Dans les conditions optimales d'activité enzymatique, l'urée est transformée très rapidement en ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) avec un pic de conversion maximum atteint en 2h après le dépôt du fumier au champ (Montenyand Erisman, 1998). Cependant, dans le fumier de volaille, il y a une étape en plus avant la transformation de l'urée en  $\text{NH}_3$ , puisqu'il y a d'abord la transformation de l'acide urique en urée qui va ralentir la production de  $\text{NH}_3$  (réaction limitante) (Groot Koerkamp, 1994). La dégradation de l'acide urique est la principale source de  $\text{N-NH}_4^+$  dans les fumiers de volailles (Vilela et al., 2020).

Les étapes de conversion de l'acide urique en  $\text{NH}_3$  sont représentées sur la *figure 2*. La première étape est la conversion de l'acide urique en urée. Ensuite, l'urée est convertie en  $\text{NH}_3$ .

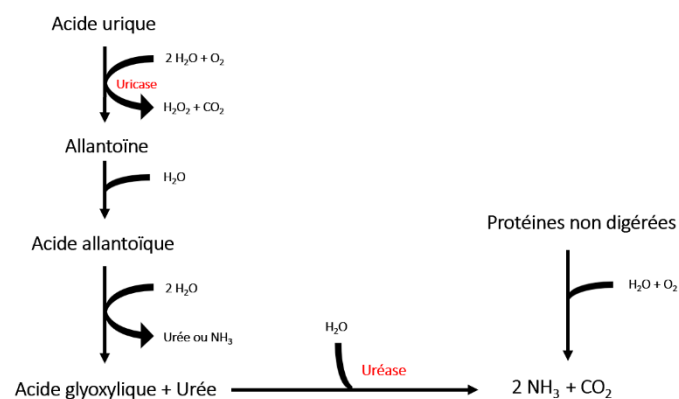


Figure 2 : Processus de conversion de l'acide urique en urée et  $\text{NH}_3$

Lors de la conversion de l'acide urique en urée, les bactéries *Bacillus pasteri* produisent une enzyme appelée uricase. L'uricase convertit l'acide urique en allantoiné, qui est ensuite

converti en glyoxylate et en urée. Ce processus de décomposition aérobie nécessite un pH d'environ 8,5 (Vilela et al., 2020). Une condition que l'on retrouve dans les fumiers de volailles.

La conversion de l'urée en  $\text{N-NH}_4^+$  est réalisée via l'action de l'uréase en présence d'eau. L'uréase décompose l'urée en ammoniac et en dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). La vitesse de conversion de l'urée en  $\text{N-NH}_4^+$  est fonction de la concentration totale en  $\text{NH}_3$  et en  $\text{N-NH}_4^+$ , de la température et du pH du fumier (Ritz et al., 2004). L'activité de l'enzyme uréase est relativement faible à des températures inférieures à  $10^\circ\text{C}$  (Vilela et al., 2020). Cependant elle augmente de manière exponentielle lorsque la température augmente. Si le niveau de pH reste inférieur à 6, l'activité de l'uréase est faible. À des pH supérieurs à 7, la libération de  $\text{NH}_3$  augmente (Vilela et al., 2020). Le dernier facteur influençant l'activité de l'uréase est le taux d'humidité du fumier de volailles. Pour que l'enzyme fonctionne correctement, le taux d'humidité doit être de minimum 40% dans le fumier (Vilela et al., 2020).

### *Le phosphore*

Dans le fumier de volaille, le phosphore est présent pour environ 60% sous forme de phosphore organique en phase solide et pour 30% sous forme de phosphore inorganique (Edwards et Daniel, 1992; Sharpley et al., 2004). Des études de fractionnement ont montré qu'une grande proportion de  $\text{P}_2\text{O}_5$  est insoluble dans l'eau. Ce qui indique que le  $\text{P}_2\text{O}_5$  est peu mobile et faiblement biodisponible (Mahimairaja et al., 1995).

### *Le potassium*

Le potassium est présent dans les fumiers de volailles sous la forme de sels inorganiques. Il est fortement mobile et donc rapidement disponible. Le potassium présente donc un risque élevé de lessivage (Dewes et al, 1996).

## 2.2.3 Itinéraire de gestion à l'échelle de la ferme et pertes potentielles en nutriments

Les pertes de nutriments arrivent assez rapidement après l'excrétion et continuent au cours des différentes phases de conduites du fumier jusqu'à ce qu'ils soient incorporés et fixés dans le sol. Attention, il ne suffit pas d'incorporer ces nutriments dans le sol. Il est important qu'ils soient apportés dans les bonnes quantités et au bon moment pour éviter le lessivage, la volatilisation et le ruissellement (Rotz, 2004).

De nombreuses études se sont penchées sur les pertes d'azote lors de la gestion des engrais de ferme. Rotz et al (2004) ont rassemblé plusieurs valeurs de perte d'N (% par rapport à l'N total excrété) en fonction de différentes structures de fermes. Ils indiquent que les pertes peuvent aller jusqu'à 50% de l'azote excrété. De Vries et al. (2001) montrent que les principales causes de perte d'azote dans l'environnement sont : la volatilisation, le lessivage et le ruissellement vers les eaux de surface et souterraines.

La gestion des engrais de ferme pour réduire les pertes de nutriments nécessite une approche globale de l'exploitation. De nombreux changements peuvent être apportés pour réduire les pertes lors de chaque étape de gestion du fumier. Cependant, réduire les pertes à

un poste est facilement contrebalancé par un autre poste s'il est moins bien géré. Les principaux postes à considérer sont : l'alimentation des animaux, le logement, le stockage du fumier et l'épandage (Rotz, 2004).

### *L'alimentation*

L'alimentation représente le point de départ de la gestion des pertes en nutriments en l'élevage. Pour réduire les pertes en azote, il faut commencer par donner une alimentation adaptée aux besoins des animaux et ainsi limiter les excrétions d'azote (Dou et al., 1996; Kohn et al., 1997; Oenema et al., 2001). En réduisant l'azote excrété, les pertes à travers toutes les étapes de gestion du fumier sont potentiellement diminuées.

L'excrétion d'azote est directement liée à l'apport en azote protéique dans l'alimentation animale (Han et al., 2001). C'est donc bien cet apport en azote protéique qui doit être réduit. Deux stratégies pour réduire l'excrétion d'N sont mises en avant par Rotz (2004). La première consiste à équilibrer l'apport protéique en améliorant l'adéquation entre quantité et qualité des protéines. L'autre est d'améliorer la productivité animale (Han et al., 2001).

### *Le logement*

Les pertes d'azote commencent rapidement après l'excrétion. Comme vu précédemment, chez les volailles, l'acide urique est transformé en urée par décomposition aérobie. Lorsqu'il est mélangé avec des enzymes uréases présentes dans les matières fécales, l'urée peut rapidement être transformée en  $\text{NH}_3$ .  $\text{NH}_3$  est très volatile et diffuse facilement dans l'air ambiant (Monteny et Erisman, 1998). Le taux de conversion de cette réaction est fonction de la quantité d'azote en présence, de la température, du pH et du taux d'humidité du fumier (Sommer and Hutchings, 1995).

Dès lors, l'approche la plus significative pour diminuer les pertes d'azote dans les étables est d'augmenter le taux de MS du fumier (Groot Koerkamp, 1994). Selon (Groot Koerkamp, 1994), l'émission de N est minimum quand un taux de MS de 60% est atteint dans les 50h après l'excrétion. De la même manière, retirer le fumier de l'étable régulièrement permet également de réduire les pertes en N (van Horne et al. 1998).

### *Stockage et épandage*

Lors de la gestion des engrais de ferme, la priorité est mise sur l'épandage des engrais de ferme durant la période hivernale. En effet, il n'y a pas de doute sur le fait que l'application de fumiers dans des conditions climatiques et pédologiques hivernales est propice à la perte de nutriments (Lewis and Makarewicz 2009). Selon Rotz et al, 2014 le stockage hivernal du fumier permet de réduire jusqu'à 8 à 10 fois le lessivage des éléments minéraux (EM) contenus dans le fumier.

Les préoccupations liées à l'application de fumier en hiver datent des années 1930. Midgley and Dunklee (1945) ont observé de grandes quantités de pertes de N dû au

ruissellement après l'application d'engrais de ferme sur des sols gelés. D'autres ont mis en avant des risques de pertes d'N et de phosphore pendant les conditions hivernales (Klausner et al. 1976; Young and Mutchler 1976; Komsiskey et al. 2011). Cependant, certaines études n'ont pas observé d'impact, sur les pertes en nutriments, lié à l'application d'engrais de ferme en hiver (Young and Holt 1977; Ginting et al. 1998). Ces résultats contradictoires reflètent la complexité de corrélérer les méthodes de gestion des engrais de ferme (application, timing, forme, méthode, quantité...) avec les conditions environnementales (météo, sol, hydrologie...). De ce fait, il est difficile d'identifier les facteurs qui déterminent les pertes de nutriments.

Le stockage du fumier est donc une phase importante dans la gestion des engrais de ferme. Il permet d'améliorer l'efficacité des nutriments présents en les appliquant aux moments opportuns (avant le semis, pendant les périodes de croissances importantes). Cela permet également de réduire les pertes d'azote en limitant le ruissellement et le lessivage. De plus, l'application d'une grande quantité de fumier sur une courte période permet une incorporation plus rapide des nutriments dans le sol. Si l'incorporation est rapide, alors les pertes par volatilisation et ruissellement sont également limitées (Liu et al., 2018).

## 2.3 STOCKAGE DU FUMIER DE VOLAILLES AU CHAMP

### 2.3.1 Estimation des pertes en EM lors du stockage au champ

Dans la bibliographie, plusieurs auteurs ont étudié les pertes en EM lors du stockage de fumiers de volailles au champ. Le principal facteur identifié dans la perte d'EM est le taux de MS (Rotz, 2004). En effet, la condition pour pouvoir stocker des fumiers de volailles au champ est d'atteindre un taux en MS de minimum 55%.

Il existe d'autres facteurs tels que la concentration initiale en azote totale, la concentration en N-NH<sub>4</sub>, le pH, les facteurs environnementaux (température, vent, précipitation, rayonnement solaire...), le rapport C:N, la quantité d'aération dans le tas. (Rotz, 2004).

#### *Pertes en azote lors du stockage*

Les pertes totales identifiées dans les fumiers en général varient selon les auteurs. Rotz et al (2004) estiment que les pertes en azote représentent 10% de l'azote total présent au début du stockage. Selon De Vries et al. (2001) les principales sources de pertes dans l'environnement lors du stockage sont la volatilisation de NH<sub>3</sub> (85%), le lessivage et le ruissellement vers les eaux de surface et souterraines (10%) et la volatilisation de N<sub>2</sub>O (5%) (*figure 3*).

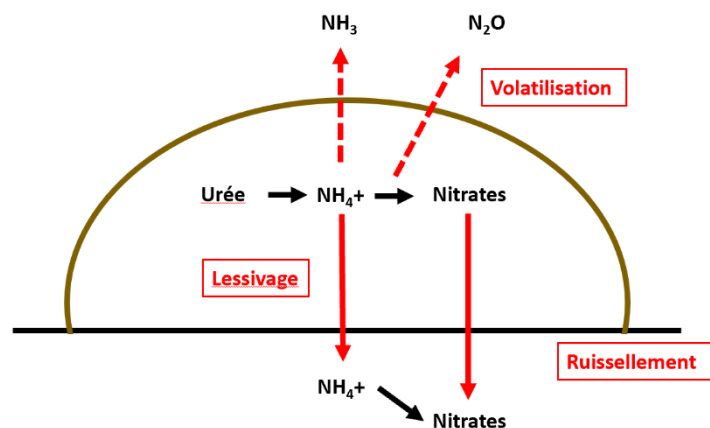


Figure 3 : Principales sources de pertes d'azote dans l'environnement lors du stockage de fumier au champ

Zebarth et al (1999) et Shah et al (2009) ont étudié plus particulièrement les fumiers de volailles. Shah et al (2009) estiment que 1,7% de l'azote contenu dans le fumier est perdu par lessivage. Selon Onema et al (2007), cette valeur peut monter jusqu'à 5%. Costello et al. (2001) ont montré que le ruissellement provenant de tas de fumier de volailles non couverts a les mêmes caractéristiques que les effluents liquides.

Zebarth et al (1999) ont mesuré la quantité d'azote dans le sol après le stockage au champ de 30m<sup>3</sup> de fumier (67% de MS) contenant 30Kg N/T. Sous le tas, la quantité d'azote est passée de 436 Kg N/ha à 3094 Kg N/ha. La quantité d'azote minéral dans le sol a donc été multipliée par 7. Et ils ont observé que 90% de cette augmentation a lieu dans les 15 premiers centimètres du sol.

Selon Shah et al. (2009), la majorité de l'augmentation en azote total dans le sol est sous la forme de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (85%). Cette augmentation provient du lessivage ou du transfert gazeux lorsque les concentrations en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> sont trop élevées (Zebarth et al., 1999). Pendant la période de stockage, la perte d'azote sous la forme nitrique est négligeable. Wetselaar et al (1972) explique ce phénomène en démontrant que la nitrification est inhibée par l'augmentation de la concentration en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Un niveau de concentration en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> supérieur à 3g/Kg (à pH neutre) devient toxique pour les bactéries responsables de la nitrification. Par contre, la nitrification de l'ammonium durant la période qui suit l'enlèvement du tas entraîne une augmentation de l'azote nitrique dans le profil du sol (Zebarth et al., 1999).

#### *Pertes liées au lessivage des EM lors du stockage*

Zebarth et al (1999) ont étudié le lessivage de différents EM. L'expérience consiste à comparer des échantillons pris sous le tas de fumier à des échantillons pris à côté du tas.

Dans les échantillons prélevés sous le tas, ils ont mesuré une augmentation de la concentration en carbone, entre 60 et 70cm de profondeur. Selon Bhogal and Shepherd (1997), sur le premier mètre de profil de sol, le carbone organique mesuré est principalement sous forme soluble après le stockage de fumier.

Ensuite, ils ont mesuré des concentrations en  $K_2O$  plus élevées sur l'entièreté du profil du sol sous les tas de fumier. Les concentrations en  $P_2O_5$  et en  $Na_2O$  sont également supérieures sous le tas de fumier, mais la différence est significative seulement sur les 60 premiers centimètres du profil. Dans une autre étude, Dewes (1995) mesurent également des pertes significatives en  $P_2O_5$  et  $K_2O$  lors du stockage de fumier de volailles au champ.

D'autre part, la concentration en  $MgO$  et en  $CaO$  n'est pas significativement différente quand les échantillons sont pris à côté ou sous le tas. Zebarth et al (1999) en concluent que la mobilité des ions monovalents et divalents est différente dans le sol. Ce caractère est lié à une plus grande affinité des ions monovalents avec les sites d'échange (CEC). Une seconde raison qui explique ce caractère est le fait qu'on retrouve une plus grande quantité d'ions monovalents que d'ions divalents dans les fumiers de volailles.

### 2.3.2 Méthodes de stockage pour limiter les pertes en EM

Différentes méthodes sont actuellement étudiées pour limiter les pertes en EM lors du stockage des fumiers de volaille au champ. La Convention-cadre de la CEE-ONU sur les bonnes pratiques agricoles pour la réduction de l'ammoniac (CEE-ONU, 2001) suggère un certain nombre de mesures :

- I. Garder les tas le plus sec possible en les stockant sous un toit, en les recouvrant d'une bâche ou, à défaut de couverture, en les stockant en tas étroits en forme de A pour favoriser le ruissellement.
- II. Façonner les tas de manière à minimiser au maximum la surface des tas.
- III. Maintenir la température des tas en dessous de  $50^{\circ}C$
- IV. Augmenter le rapport C:N des fumiers. Kithome et al (1999) et Preusch et al (2002) ont étudié l'effet de différents amendements carbonés (pailles, copeaux de bois, tourbe) lors du compostage. Un rapport C:N  $>25$  permet aux populations de micro-organismes de se développer et d'immobiliser l'azote rapidement disponible contenu dans les tas (Alexander, 1977).

Certaines études ont été faites sur des amendements minéraux. L'addition de soufre élémentaire dans le fumier permet de réduire le pH des tas. Ce qui limite la volatilisation de l'azote en  $NH_3$  (Mahimairaja et al., 1993). Selon Guo and Song, 2009, l'utilisation d'aluminium et de zéolite permet de limiter la volatilisation de l'N et la solubilisation de  $P_2O_5$  lors du stockage du fumier. Grâce à leur structure étendue, les zéolites peuvent adsorber des volumes de gaz très importants et ainsi fixer l'ammoniac.

Il a été démontré que le compostage aérobie des fumiers solides (facilité par le retournement) présente un certain nombre d'avantages agronomiques. Notamment une réduction du volume des tas, la suppression des agents pathogènes, la destruction des graines de mauvaises herbes et la production d'une MO stabilisée, plus facile à épandre. Cependant, le retournement des tas de fumier solide augmente l'échange d'air à travers le matériau et il a été démontré qu'il augmente les émissions de  $NH_3$  (Amon et al., 2001 ; Parkinson et al., 2004 ; Sagoo et al., 2005).

### *Utilisation de couverts pour limiter les pertes en EM lors du stockage*

La majorité des études qui ont été faites concernant l'impact des couverts sur les pertes en EM ont été réalisées sur des fumiers de bovins. Les différents types de couverts envisagés sont : bâche en plastique, paillage, géotextile, tourbe.

La question est donc de savoir si les résultats obtenus sur les tas de fumiers de bovins peuvent être extrapolés aux fumiers de volailles. Selon Dewes (1995), couvrir les tas de fumier de bovins avec une bâche plastique lors du stockage a un effet réduit sur le lessivage. Ils estiment que la majorité du lessivage se fait via l'eau contenue dans le tas et s'opère rapidement après le dépôt du fumier au champ. En effet, on retrouve plus d'eau dans les fumiers de bovins que dans les fumiers de volailles. Tout d'abord, parce que le taux de MS est plus faible dans les fumiers de bovins. Ensuite, parce que le compostage est plus important dans les fumiers de bovins que dans les fumiers de volailles et que les réactions de décomposition aérobie liées au compostage sont responsables de la production d'eau dans les fumiers. L'auteur en conclut que la différence de taux d'humidité des tas est probablement la cause de mécanismes de pertes en nutriments différents entre les fumiers de bovins et les fumiers de volailles.

Les auteurs qui se sont intéressés aux impacts des couverts sur les fumiers de volailles présentent des résultats aléatoires.

Rodhe and Karlsson (2002) ont déterminé que couvrir les tas de fumiers avec de la tourbe permet de réduire les pertes de  $\text{NH}_3$  de 80-90%. En revanche, couvrir les tas avec de la paille n'aurait pas d'effet sur la volatilisation de  $\text{NH}_3$ .

Ritter et al. (1994) ont mesuré les concentrations en EM dans le sol (sous les tas de fumier) et dans les eaux souterraines. Ils n'ont pas mis en évidence de différence entre les concentrations en minéraux pour les tas couverts (bâche en plastique) et les tas non couverts. Les auteurs ont conclu que l'une des principales sources de pollution par l'azote est un enlèvement non optimal du fumier après le stockage.

Zebarth et al. (1999) ont également mesuré l'impact d'un couvert avec une bâche plastique sur les pertes en EM durant toute la période du stockage hivernal. Des échantillons de sol ont été pris avant et après le stockage sur une profondeur de sol de 210cm. Les concentrations en nitrates et en  $\text{N-NH}_4$  ont été mesurées au laboratoire. Les résultats indiquent une augmentation en N inorganique plus importante sous le tas non couvert. 50% de l'augmentation de l'azote inorganique est sous la forme de  $\text{N-NH}_4^+$  et se fait dans les 30 premiers centimètres du profil. Sous le tas couvert, 96% de l'augmentation de l'azote inorganique est sous la forme  $\text{N-NH}_4^+$  et se produit sur l'entièreté du profil.

Sagoo et al. (2007) ont comparé les effets de 5 méthodes de stockage sur les émissions d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ). Parmi les différents traitements, il y avait des tas non couverts, des tas bâchés et des tas stockés sous toit. 13,2% de l'azote contenu dans les tas est volatilisé en  $\text{NH}_3$  pour les tas non couverts. Le stockage de la litière de poulets de chair sous toit a augmenté les pertes de  $\text{NH}_3$  d'environ 45% par rapport au traitement sans couvert (19,0% de l'azote stocké). Et le bâchage des tas a réduit les pertes de  $\text{NH}_3$  d'environ 90 % par rapport au

traitement sans couvert (1,3% de l'azote stocké). Le taux de perte de  $\text{NH}_3$  s'est fait à un rythme constant pendant la période de stockage de 6 mois. Avec 25% des émissions totales de  $\text{NH}_3$  se produisant durant le premier mois de stockage. D'autre part, les pertes d'azote par lessivage représentaient entre 0% et 2,9% du N total stocké. Il n'y a pas de lessivage sur les tas stockés sous toiture. Le lessivage le plus important a lieu dans les tas bâchés (2,9% de l'azote total stocké). Tandis que les pertes au niveau des tas non couverts représentent 0,8% de l'azote total stocké.

### 2.3.3 Impacts sanitaires et environnementaux

Les fumiers de volailles peuvent constituer une menace potentielle pour la santé humaine et avoir un impact négatif sur l'environnement naturel. En particulier sur la qualité de l'eau, du sol et de l'air (Myszograj et Puchalska, 2012).

La lixiviation des nitrates dans les eaux souterraines est l'une des principales préoccupations en matière de perte d'azote. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) recommande de ne pas dépasser des concentrations supérieures à 50 mg/L de  $\text{NO}_3^-$  dans les eaux souterraines. De telles concentrations sont potentiellement nocives pour la santé humaine, en particulier pour les nourrissons et les jeunes enfants (Di et Cameron, 2002).

Les effluents de volailles représentent également un potentiel risque de contamination des eaux de surfaces et de l'environnement. Des études ont déterminé le lien entre la présence d'EM tels que l'azote et le phosphore et une augmentation de l'eutrophisation (Novatny et Olem, 1994). Dans l'environnement, l'eutrophisation cause de nombreux problèmes : prolifération d'algues, problèmes d'odeurs, augmentation de la turbidité, augmentation d'espèces indésirables et diminution de la concentration en oxygène (Elmgren, 2002).

De nombreuses inquiétudes se développent également concernant les émissions d'azote dans l'atmosphère. Car la volatilisation de l' $\text{N-NH}_4$  contribue à la fertilisation, l'acidification et l'eutrophisation des écosystèmes (Salim et al, 2014). En 2015, le secteur agricole était responsable de 94% des émissions totales de  $\text{NH}_3$  en UE (Eurostat, 2018). Le  $\text{N}_2\text{O}$  issu de la dénitrification est un puissant gaz à effet de serre (300 fois plus puissant que le  $\text{CO}_2$ ) dont la durée de vie dans l'atmosphère est de 120 ans (Wheeler et al., 2006).

Il existe d'autres sources de pollutions dont les origines viennent des effluents d'élevage. La présence d'éléments traces et de métaux lourds contamine les sols, les nappes phréatiques et affecte les organismes vivants dans les sols (He et al, 2005). Le fumier peut contenir des pathogènes susceptibles d'entrer dans la chaîne alimentaire humaine (Bicudo et Goyal, 2003). Les antibiotiques utilisés dans les élevages peuvent également atteindre le sol via les fumiers (Kümmerer, 2009).

Le maintien de la qualité de l'environnement est donc une considération majeure lors de l'élaboration de pratiques de gestion des effluents d'élevages.

## 2.4 CADRE LÉGAL

En Europe, la gestion des engrais de ferme est régulée par la Directive sur les nitrates. Elle fait partie intégrante de la Directive-cadre sur l'eau et représente l'un des instruments clefs dans la protection de l'eau en agriculture.

### 2.4.1 La Directive sur les nitrates

La Directive impose aux États membres de déterminer un cadre légal pour la gestion des nitrates en agriculture. L'objectif étant de limiter les pollutions liées à l'utilisation d'engrais azotés et leurs impacts sur la qualité des eaux de surfaces et souterraines, sur la santé de la population européenne et sur l'eutrophisation des mers.

Conformément à la Directive, les États membres doivent mettre en place certaines mesures telles que le contrôle de l'ensemble des types de masses d'eau, l'identification des eaux polluées ou exposées à un risque de pollution, la désignation de zones vulnérables aux nitrates et la rédaction de codes de bonnes pratiques agricoles.

### 2.4.2 PGDA

Pour répondre à cette directive, la Wallonie a lancé un « Programme de Gestion Durable de l'azote en Agriculture » (PGDA). Ce programme prévoit notamment les conditions de stockage de l'azote organique à la ferme et au champ, les quantités maximales épandables, les périodes autorisées pour l'épandage et les conditions spécifiques aux zones vulnérables aux nitrates.

Pour que le stockage des fumiers de volailles au champ soit autorisé, les conditions suivantes doivent être respectées (cf. l'arrêté du Gouvernement wallon relatif à la gestion durable de l'azote en agriculture (13 juin 2014)) :

1. Le stockage au champ des effluents de volaille caractérisés par une teneur en MS inférieure à 55 % est interdit ;
2. Toute aire de stockage de fumier de volaille non aménagée conformément à l'article R.200 est évacuée au terme d'une période maximale de huit mois ;
3. Toute aire de stockage de fiente de volaille est évacuée au terme d'une période maximale d'un mois ;
4. Le stockage des effluents de volaille est interdit sur une aire ayant été évacuée depuis moins d'une année et à moins de 10 mètres des limites extérieures de l'aire précédente ;
5. Aucun dépôt d'effluents de volaille au champ ne peut être implanté au point bas d'un creux topographique ni à moins de 20 mètres d'une eau de surface, d'un ouvrage de prise d'eau, d'un piézomètre ou d'un point d'entrée d'égout public; cette distance pourra être réduite à 10 mètres si la topographie du lieu ou un dispositif spécifique rend impossible tout écoulement de jus vers ces points; le ruissellement éventuel de jus issu de ce dépôt ne pourra atteindre une eau de surface, un ouvrage de prise d'eau, un piézomètre ou un point d'entrée d'un égout public ;
6. Le stockage des effluents de volaille au champ peut également s'effectuer sur une aire bétonnée étanche, telle que spécifiée à l'article R.198.



### 3 OBJECTIF DE L'ÉTUDE

---

L'objectif de ce mémoire est de quantifier les effets de 3 méthodes de stockage de fumiers de volailles aux champs pendant la saison hivernale. La quantification porte sur les pertes en EM par lessivage, ruissellement et volatilisation. Les 3 méthodes de stockage sont : stockage conventionnel (pas de couvert), couvert végétal, couvert géotextile.

Pour se faire, différents sous-objectifs ont été déterminés :

- Identifier les différents EM perdus lors du stockage de fumier de volailles au champ.
- Quantifier les pertes pour ces différents EM.
- Caractériser les différents mécanismes de pertes en azote : volatilisation, lessivage, ruissellement.
- Comparer les résultats pour les 3 différents traitements.

À terme, l'intérêt de cette étude sera de comparer les résultats expérimentaux ainsi obtenus avec la littérature, pour ensuite, déterminer les périodes critiques et évaluer les potentielles pertes en EM lors du stockage du fumier de volailles à l'échelle de la Wallonie et de la Belgique. Et finalement, proposer des méthodes de stockage du fumier de volailles plus optimales pour limiter les impacts sur l'environnement et la santé.



## 4 MATÉRIEL ET MÉTHODE

### 4.1 CONTEXTE DE L'ÉTUDE

Pour répondre aux objectifs de ce mémoire, nous avons travaillé en collaboration avec 2 agriculteurs : Matthieu Marchal et Benoît Vandevoord. Monsieur Marchal est éleveur de poulets de chair à Louvain-la-Neuve et fournit du fumier de volailles à monsieur Vandevoord agriculteur à Sart-Messire-Guillaume (Brabant Wallon).

Tous les 2 mois, environ 100T de fumier sortent des poulaillers de Monsieur Marchal. Selon la période, le fumier est directement appliqué ou bien stocké au champ. Fin août 2021, le fumier est directement épandu avant les semis de couverts. Deux mois plus tard, le 26/10/21, 90T de fumier sont répartis sur 5 tas dans un champ de monsieur Vandevoord pour un stockage hivernal.

Sur les 5 tas présents dans la zone de dépôt, seulement 3 sont analysés. Les autres ne font pas partie de l'étude. Chacun des 3 tas analysés représente une méthode de stockage différente : sans couvert (SC), couvert végétal (CV), couvert géotextile (CG). Un dispositif d'échantillonnage des pertes de jus par lessivage et par ruissellement est mis en place sous chacun des tas. Ce dispositif permet de suivre la dynamique des pertes pour les différents EM.

### 4.2 PRÉSENTATION DU SITE D'ÉTUDE

Le fumier de volailles est stocké en champ à Sart-Messire-Guillaume (Brabant Wallon). Les coordonnées précises de la zone de dépôt sont : 50.623178, 4.571954 (*figure 4*).

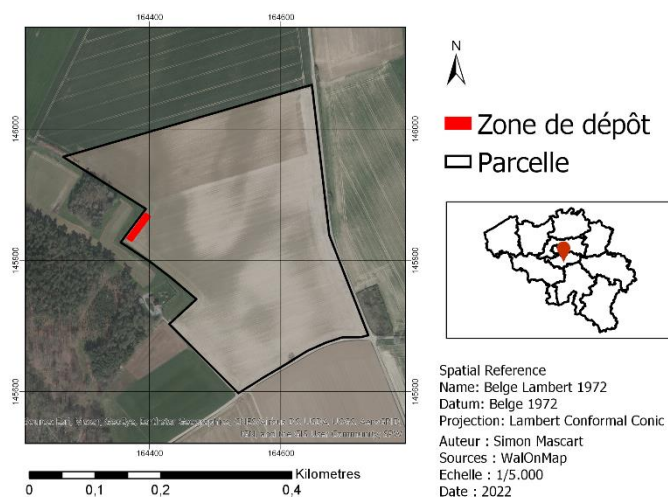


Figure 4 : Carte illustrant la localisation de la zone de dépôt de fumier étudié

La parcelle est située dans la région agricole sablo-limoneuse. Le sol a des caractéristiques à drainage naturel excessif ou légèrement excessif. Selon le PGDA, la parcelle se situe en zone vulnérable aux nitrates. C'est-à-dire que sur cette zone, la limite de 50mg/L de nitrates dans les eaux souterraines est dépassée ou risque d'être dépassée. Des mesures spécifiques en matière de gestion des engrais des fermes y sont donc appliquées.

### 4.3 DÉROULEMENT DE L'EXPÉRIMENTATION

Dès l'arrivée du fumier de volailles au champ (26/10/21), la première étape réalisée est l'échantillonnage et la caractérisation du fumier de départ. La mise en place du dispositif de récupération des jus sous les tas et des couverts débute le 27/10/21 et se clôture le 29/10/21. Le CV est semé après la première pluie, c'est-à-dire le 30/10/21. Après l'installation du dispositif expérimental, le cubage et la modélisation des 3 tas sont réalisés.

Différentes mesures et analyses sont réalisées durant les 4,5 mois d'expérimentation. Tout d'abord la quantification et l'analyse des pertes de jus au niveau de chaque tôle. Le suivi de la température dans les différents tas. Le suivi des précipitations. Et finalement le suivi du front d'humectation. À la fin de l'expérimentation, le fumier est échantillonné et analysé pour une caractérisation du fumier après stockage.

### 4.4 CARACTÉRISATION DU FUMIER DE DÉPART

La caractérisation du fumier de départ est réalisée en 2 étapes.

1. La mesure de la densité du fumier est réalisée au champ.
2. Des échantillons du fumier sont réalisés, pour une analyse de la composition du fumier en laboratoire.

Pour ces 2 étapes de caractérisation, 3 échantillons sont réalisés de manière aléatoire dans chacun des tas. L'échantillonnage aléatoire permet de prendre en compte les potentielles différences de composition du fumier relatives aux zones d'extraction dans le poulailler. En effet, dans les poulaillers on retrouve différentes zones qui correspondent aux mangeoires, aux abreuvoirs et aux dortoirs. Ces zones particulières se distinguent par des quantités de fientes et des teneurs en MS différentes (Chambre d'agriculture de Bretagne, Itavi 1999).

#### 4.4.1 Mesure de la densité du fumier de départ

La mesure de densité du fumier est réalisée en suivant la méthode ci-dessous.

Une cuvette de 90L est remplie de fumier frais et pesée à l'aide d'une balance plate-forme. La densité est calculée via la formule suivante :

$$Densité = \frac{Masse\ de\ fumier\ [Kg]}{Volume\ de\ la\ cuvette\ [m^3]} = \frac{Masse\ de\ fumier}{0.09} \quad (1)$$

La densité moyenne du fumier est ensuite calculée en faisant la moyenne des neuf mesures de densité réalisées.

#### 4.4.2 Méthode d'échantillonnage et de conservation

Les neuf échantillons de fumier frais sont réalisés dès l'arrivée du fumier sur la zone de dépôt. Il est à remarquer qu'il n'a pas plu entre le moment de dépôt et l'échantillonnage. Dès lors, nous estimons qu'à ce stade, la composition en EM dans les différentes couches du tas est homogène.

Les échantillons sont composés d'environ 2Kg de fumier et placés dans des sacs en plastique (*figure 5*). Après prélèvement, les échantillons sont conservés dans une chambre froide à une température comprise entre 1°C et 4°C en attendant d'être analysés.



Figure 5 : Illustration des 9 échantillons de fumier frais réalisés avant le stockage du fumier

#### 4.4.3 Méthode d'analyse de la composition du fumier au laboratoire

Toutes les analyses sont réalisées au laboratoire du centre de recherche agronomique de Michamps (Bastogne).

Les échantillons sont analysés via un spectromètre PIR (proche infrarouge). Certains résultats sont confirmés par méthodes de références au laboratoire si nécessaire.

Dans les laboratoires Requasud, l'utilisation de la spectrométrie PIR est largement utilisée pour l'analyse des sols, des fourrages et des denrées alimentaires. Depuis quelques années, l'analyse des engrais de ferme par spectrométrie PIR est en développement. Les bases de données pour les fumiers et les lisiers doivent encore être étoffées et validées.

Dans le cadre de ce mémoire, les paramètres physiques et chimiques analysés sont : la teneur en MS, MO, l'azote total et ammoniacal et les minéraux ( $P_2O_5$ ,  $K_2O$ ,  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$ ).

##### *Préparation des échantillons*

La préparation des échantillons est minimale en analyse par spectrométrie PIR. Elle consiste à réaliser un séchage et un broyage de l'échantillon.

L'échantillon est séché à 60°C à l'étuve (*figure 6*) afin d'éviter les réactions de Maillard. Le séchage dure environ 48h. Le temps que l'échantillon atteigne un poids constant.



Figure 6 : Étuve pour le séchage des échantillons à 60°C

Le broyage de l'échantillon est réalisé à l'aide d'un broyeur à couteau (figure 7). Cette étape permet d'homogénéiser l'échantillon et d'en réduire la granulométrie. Si la taille des particules n'est pas fine et homogène, cela peut induire des interférences dans la mesure spectrométrique.



Figure 7 : Broyeur à couteau à volume conséquent

### ***Teneur en matière sèche (MS)***

La détermination de la teneur en MS des échantillons est réalisée suivant la méthode officielle AOAC 967.03. Une fraction de l'échantillon est placée dans une étuve à 103°C pendant 4h. La teneur en MS est ensuite estimée en mesurant la différence de poids (due à la perte d'eau) avant et après le passage à l'étuve.

### ***Teneur en matière organique***

La teneur en MO est mesurée via la méthode de perte au feu (PAF). C'est donc une détermination pondérale basée sur la calcination (550°C) de la MO totale.

Par convention, cette méthode permet de déduire le taux de carbone organique d'un échantillon. Le taux de MO est obtenu via l'équation suivante :

$$\text{Carbone (C)} = \text{MO} / 2$$

### *Teneur en matière azotée totale (MAT)*

La teneur en matière azotée totale est déterminée par la méthode Kjeldahl (références normatives ISO 6491 : 1998).

L'échantillon subit une hydrolyse et est digéré dans de l'acide sulfurique ( $H_2SO_4$ ) en présence d'un catalyseur (*figure 8*). Cette étape permet la libération de l'azote sous forme de sel ammoniacal ( $(NH_4)_2SO_4$ ). Le sel est ensuite redissout grâce à un ajout de base forte et d'eau pour libérer l'ion ammonium. Celui-ci est entraîné à la vapeur vers une solution piège d'acide borique dans l'appareil de distillation Büchi K-355 (*figure 9*). Finalement, l'acide borique et l'ammonium forment un complexe qui est titré par une solution d'HCL 0.1 N.



*Figure 8 : Méthode Kjeldahl : Digestion de l'échantillon dans l'acide sulfurique*



*Figure 9 : Méthode Kjeldahl : distillation avec l'appareil de distillation Büchi K-355*

### *Teneur en azote ammoniacal*

La teneur en ammonium est déterminée par titration (HCL 0.1 N) après dilution à la vapeur (Büchi K-355) en milieu modérément basique (MgO).

### *Teneur en phosphore ( $P_2O_5$ )*

La teneur en phosphore est déterminée par dosage au jaune (métavanadate d'ammonium). Après oxydation nitrique et incinération, l'acide phosphorique est dosé par colorimétrie.

### *Teneur en $K_2O$ , $Na_2O$ , $MgO$ , $CaO$*

Les teneurs en  $K_2O$ ,  $Na_2O$ ,  $MgO$ ,  $CaO$  sont déterminées par spectrophotométrie de flamme.

## 4.5 DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL DE RÉCOLTE DE JUS AU CHAMP

L'échantillonnage et la quantification des jus de lessivage et de ruissellement sont réalisés via des dispositifs de récolte des jus sous les tas de fumier. Au total, 9 dispositifs sont mis en place pour l'expérimentation. Ce qui représente 3 dispositifs par traitement.

### 4.5.1 Fonctionnement du dispositif

Les différents composants du dispositif sont (*figure 10*) :

1. Une tôle ondulée (2m x 0.82m) placée sous le tas de fumier
2. Une gouttière en PVC (1m)
3. 2 fixations Gofix (fixation gouttière-tôle ondulée)
4. Une cuvette de 90L

La tôle ondulée est placée sous le tas de fumier de manière à intercepter les jus produits par le lessivage et le ruissellement avant qu'ils n'atteignent le sol. Les jus ainsi récoltés sont redirigés vers la cuvette de 90L par la gouttière. La cuvette sert de réservoir de récupération.

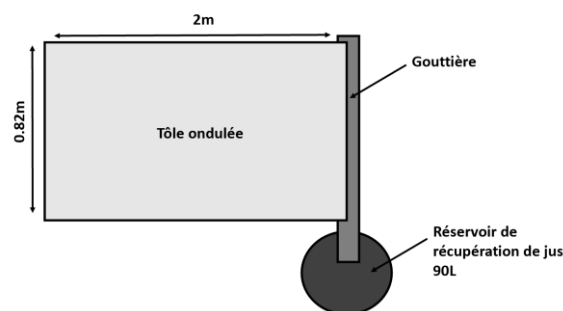


Figure 10 : Dispositif de récolte des jus de lessivage et de ruissellement

#### 4.5.2 Particularité du positionnement des tôles ondulées sous les tas

Le positionnement optimal des tôles ondulées sous les tas de fumier représente l'étape la plus complexe de la mise en place du dispositif de récolte des jus. Trois paramètres sont à prendre en compte : la position sous le tas, l'inclinaison et la courbure de la tôle.

La tôle doit être positionnée de manière à récolter les jus sur seulement la moitié du tas. Étant donné la forme concave des tas de fumier, lors des précipitations, le ruissellement se fait de part et d'autre du point culminant du tas (*figure 11*). L'extrémité de la tôle qui est dans le fumier doit donc être positionnée au centre du tas pour que l'échantillonnage des jus lié au lessivage et au ruissellement représente bien la même section du tas.

La tôle doit former un angle d'environ 5° par rapport à l'horizontale, de manière à induire un écoulement préférentiel des jus vers la gouttière. Tel que représenté sur la *figure 11*.

La tôle doit prendre une courbure légèrement convexe (*figure 12*) pour s'assurer que les jus interceptés ne dérivent pas hors de la tôle. Ce qui induirait une sous-estimation des pertes liées au lessivage.

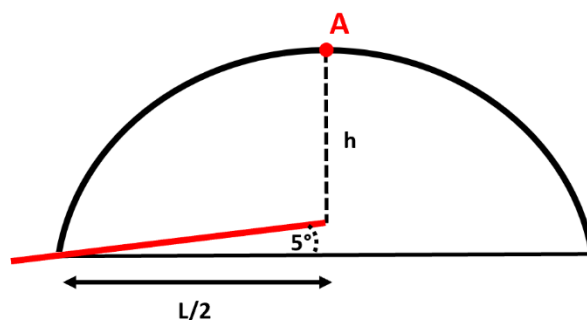


Figure 11 : Positionnement optimal de la tôle de récupération sous le tas



Figure 12 : Courbure optimale de la tôle de récupération sous le tas

#### 4.5.3 Étapes de mise en place des dispositifs

La mise en place des neuf dispositifs est réalisée le mercredi 27/10/21 avec l'aide de monsieur Benoît Vandevord qui a mis à disposition son Merlot (engin agricole doté d'un chargeur) pour la manutention du fumier.

Au départ, il est prévu d'enfoncer les tôles dans les tas déjà construits. Tel qu'illustré sur la *figure 13*. Cependant, via cette méthode, la résistance exercée par le tas cause des

déformations dans les tôles. Ce qui aurait perturbé l'écoulement des jus. De plus, via cette méthode, il est beaucoup plus compliqué de contrôler le positionnement optimal des tôles dans le tas.



Figure 13 : Positionnement des tôles de récupération par enfouissement à l'aide du chargeur du Merlot

La méthode utilisée est donc le déplacement et la reconstruction totale des tas sur les tôles. Les étapes relatives à cette méthode sont décrites ci-après et illustrées à la *figure 14*.

**Étape 1 :** Une couche de fumier est étendue préalablement sur le sol de manière à produire une légère pente sur laquelle les tôles sont déposées. De part et d'autre de cette fondation, le niveau de fumier est respectivement de 20cm et 0cm de manière à générer une pente d'environ 5°.

**Étape 2 :** Pour chacun des 3 tas, 3 tôles sont disposées selon les particularités déterminées au point 4.4.2. Tout en s'assurant que l'extrémité de la tôle donnant sur l'extérieur du tas dépasse de plus ou moins 15cm.

**Étape 3 :** Les tas sont déplacés et reconstruits sur les tôles de manière à produire des tas d'environ 3,5m de large sur 10m de long avec une hauteur de 1m à 1,5m.

**Étape 4 :** Au niveau de chaque tôle, un trou pouvant accueillir une cuvette de 90L est creusé. Les dimensions du trou sont surestimées par rapport à celles de la cuvette pour éviter toute contamination de terre ou ruissellement venant des bords du trou.

**Étape 5 :** Comme indiqué sur la *figure 14*, la cuvette est reliée à la tôle via une gouttière en PVC.

**Étape 6 :** La gouttière et la cuvette sont recouvertes d'une tôle pour éviter toute dilution par les précipitations directes.

*Etape 1*



*Etape 2*



*Etape 3*



*Etape 4 et 5*



*Etape 6*



*Figure 14 : Étapes de mise en place des dispositifs de récupération des jus de lessivage et de ruissellement sous les tas de fumier*

## 4.6 MISE EN PLACE DES COUVERTS

Trois conditions de stockage sont comparées. Le premier tas est couvert par un géotextile de type Toptex (Tissubel). Un CV (semi d'escourgeon) est planté sur le second tas. Et le troisième tas n'est pas couvert. Il sert de témoin.

### 4.6.1 Couvert géotextile (CV)

Ce type de couvert est utilisé pour protéger les betteraves stockées au champ avant qu'elles ne soient livrées à la sucrerie. Il existe plusieurs types de géotextiles selon la densité du feutre en polypropène qui le constitue. Pour couvrir les tas de betteraves, mais également les tas de compost, une densité de 200g/m<sup>2</sup> est recommandée. Il faut compter 2-3€/m<sup>2</sup> et la durée de vie de ce type de bâche est estimée à 5 ans (PYPE : Agro et Geotextile).

Le CG est sélectionné pour ses propriétés imperméable à l'eau et perméable à l'air. Lors des précipitations, l'eau ruisselle sur le couvert et n'entre pas dans le tas. Pour minimiser l'infiltration d'eau, il est donc conseillé de construire le tas en forme conique avec des pentes latérales prononcées (Itavi : Préconisations techniques et réglementaires, 2019). Dans ces conditions, l'eau ne stagne pas sur le géotextile et ruisselle totalement.

D'autre part, la perméabilité à l'air du couvert permet d'éviter les réactions anaérobies responsables de la production de gaz non désirés. Cette propriété permet également de limiter les phénomènes d'autocombustion et de condensation dans les tas de fumier (Itavi : Préconisations techniques et réglementaires, 2019).

Les modalités de mise en place pour l'expérimentation sont les suivantes. Après la construction du dispositif de récupération des jus, le géotextile (Tissubel 200 pour fumier et compost : 200g/m<sup>2</sup>) est déposé sur le tas manuellement. Il est tenu en place par des sacs de sable placés tous les 3m attachés sur le géotextile avec des fixations Tissubel (*figure 15*).

La particularité du CG est que le ruissellement sur le géotextile n'est pas récupéré par le dispositif de récupération des jus. Il est décidé de court-circuiter le ruissellement provenant du géotextile tel qu'illustré sur la *figure 16*. Tout d'abord parce que les cuvelles de stockage risquent de se remplir trop rapidement. Ce qui représente un risque important de débordement lors de périodes de précipitations intenses. De plus, les concentrations en EM dans cette eau de ruissellement sont très faibles. De ce fait, nous avons décidé que le coût des analyses des nombreux échantillons n'était pas justifié par rapport à la faible quantité d'informations apportées.



Figure 15 : Dispositif expérimental pour le fumier stocké sous le CG



Figure 16 : Court-circuitage du ruissellement provenant du géotextile à l'aide d'une gouttière en PVC fixée au géotextile

#### 4.6.2 Couvert végétal (CV)

En réponse aux préoccupations environnementales, l'utilisation de bâche en plastique en agriculture est remise en question.

Aucun essai relatif à l'utilisation de couverts végétaux pour le stockage des effluents d'élevages n'a été identifié dans la littérature. Les détails techniques liés à l'implantation du couvert sont donc basés sur les résultats de tests réalisés sur des silos par le Centre Indépendant de Promotion Fourragère (CIPF).

Les préoccupations premières liées à l'implantation d'un tel couvert sur un tas de fumier de volailles sont :

1. L'impact de l'élévation de la température du lit de semence sur la germination et la croissance du couvert.
2. La concentration importante en azote dans le tas de fumier (apport excessif pour la plante ?)
3. Le pH relativement neutre spécifique au fumier de volailles pourrait avoir un impact sur la germination et la croissance du couvert.

Une couche de composte de 5 à 10cm d'épaisseur est ajoutée sur l'entièreté de la surface du tas avant le semis. Cela a pour objectif de maximiser les chances de levée en assurant un substrat propice au développement initial du couvert. Le composte est produit à la station de compostage *inbw* de Basse-Wavre. Il est obtenu à partir des déchets verts (herbes, tailles de haies, branchages, etc.) apportés par les particuliers dans les recyparcs. Après broyage, ces déchets verts sont disposés en andains au sein desquels commence une phase de décomposition sous l'effet de micro-organismes. La durée de cette phase de compostage est de 8 à 9 mois. En fin de cycle, le produit est tamisé à des mailles de 15 mm ou de 40 mm.

Le couvert sélectionné est un semis d'escourgeon. Selon le rapport du CIPF (CIPF : Quelles alternatives pour les plastiques agricoles en Wallonie ?, 2021), l'escourgeon a une croissance relativement rapide (levée en 2-3 jours et recouvrement en 8 jours sur silo de maïs) avec un potentiel couvrant intéressant. La période de disponibilité et de semis du matériel est septembre-octobre. Ce qui correspond bien au début de la période de stockage hivernal des fumiers de volailles au champ. De plus, la durée de maintien du couvert est estimée à 6-9 mois.

Les modalités de mise en place du CV sont les suivantes. Après la construction du dispositif de récupération des jus, 2m<sup>3</sup> de compost sont étendus sur le tas. Le semis d'escourgeon est réalisé le 30/10/21 à la volée avec une densité d'environ 2-3Kg/m<sup>2</sup>. Le semis est réalisé après que le compost soit humidifié par les précipitations. De manière à ce que les semences collent bien au substrat et pour vérifier que la couche de compost ne soit pas trop érodée par les précipitations.

La levée et le développement de l'escourgeon ne sont pas homogènes sur l'entièreté du tas. Des intrusions de faisans sur le site d'expérimentation sont observées. Le 24/11/21, il est décidé de réaliser un sursemis avec un froment d'hiver (disponible à la ferme de Benoît Vandevord). Le sursemis est protégé par un filet de protection contre les volatiles mis en place sur l'entièreté du tas (*figure 17*).



*Figure 17 : Dispositif expérimental pour le fumier stocké sous le CV*

#### 4.6.3 Témoin (SC)

En général si les normes du PGDA relatives au stockage des fumiers de volailles au champ sont respectées, les tas au champ sont stockés SC. Dès lors, pour représenter les conditions de stockage principalement mises en place en Wallonie et en Belgique, un tas de fumier de volaille stocké SC est également analysé dans le cadre de cette étude.

Pour le tas témoin, après la mise en place du dispositif de récupération des jus, il n'y a pas de modalité particulière (figure 18).



Figure 18 : Dispositif expérimental pour le fumier stocké SC

#### 4.7 MODÉLISATION ET CUBAGE DES TAS

La modélisation des différents tas est réalisée via le logiciel Python. Le code mis au point (*Modélisation des tas*) considère l'implémentation de 4 mesures (figure 19) réalisées sur le terrain :

1. La mesure de la longueur au sol du tas [m]
2. La mesure de la largeur au sol du tas [m]
3. La mesure de la longueur de l'arc de cercle délimitant la surface du tas [m]
4. La mesure de la hauteur du tas [m]

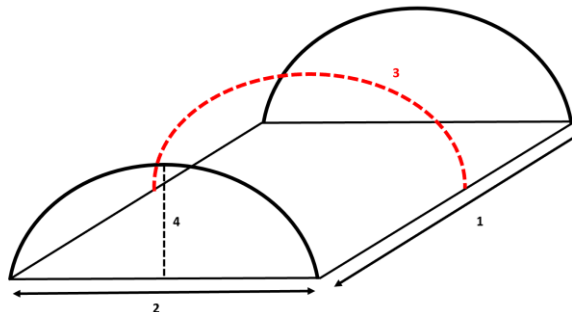


Figure 19 : Schéma illustrant les 4 mesures réalisées sur le terrain pour la modélisation des tas

Le modèle estime la fonction mathématique représentant au mieux la courbe du tas par rapport aux 2 racines (déterminées par la mesure de la largeur au sol du tas), le point

maximum de la courbe (déterminé par la hauteur du tas) et la longueur de l'arc de cercle délimitant la surface du tas.

L'estimation de l'aire de la section du tas est ensuite calculée par primitivation de la surface sous la courbe. Et le volume du tas (V) est estimé via la multiplication de l'aire de la section du tas (A) par la longueur du tas (L).

$$V [m^3] = A * L \quad (2)$$

L'estimation du volume de fumier au-dessus de chaque tôle se fait de la même manière que pour le volume du tas de fumier. Moyennant la détermination de la longueur de la tôle sous le tas (mesure « i » sur le terrain) et la largeur utile de la tôle (0.82m).

$$\text{Volume de fumier sur la tole } [m^3] = \int_0^i f(x) * 0.82 \quad (3)$$

Avec f(x) la fonction mathématique de la courbe estimée, et i la longueur de la tôle recouverte de fumier.

## 4.8 CARACTÉRISATION DES JUS DE LESSIVAGE ET DE RUISSELLEMENT

### 4.8.1 Méthode d'échantillonnage des jus et conservation

Le suivi du volume de jus dans les cuvelles est réalisé minimum 2 fois par semaine. Plus régulièrement si les conditions climatiques l'exigent. Le volume d'échantillonnage minimum est de 6L. En général, l'échantillonnage est réalisé lorsque le volume de jus récolté est d'environ 15-20L dans la cuvelle.

L'échantillonnage se fait en 2 étapes :

*Étape 1* : Mesure du volume de jus récolté pour chaque cuvelle à l'aide de 2 cruches graduées (3L et 5L). Pour mesurer la totalité du jus récolté, la cuvelle est extraite du trou de manière à savoir la vider complètement.

*Étape 2* : Pour chaque cuvelle, un échantillon d'environ 6L de jus est prélevé et conservé hermétiquement dans des bidons prévus à cet effet (*figure 20*). Avant de réaliser le prélèvement, le jus est mélangé pendant 30 secondes pour homogénéiser le liquide et solubiliser les éléments qui auraient sédimenté dans le fond de la cuvelle.

Après prélèvement, les échantillons sont conservés dans une chambre froide à une température comprise entre 1°C et 4°C en attendant d'être analysés.



Figure 20 : Photo illustrant l'échantillonnage des jus de lessivage et de ruissellement

#### 4.8.2 Analyses des jus au laboratoire

Toutes les analyses sont réalisées au laboratoire du centre de recherche agronomique de Michamps (Bastogne).

Contrairement aux échantillons de fumier solides, les jus ne passent pas au NIR. Les analyses sont réalisées directement sur échantillon liquide au laboratoire via les méthodes de références. Toutes les informations relatives aux protocoles utilisés sont reprises au point 4.2.3.

Pour les échantillons de lessivage et de ruissellement, les EM analysés sont : l'NT, l'N-NH<sub>4</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O.

#### 4.9 SUIVI DES PRÉCIPITATIONS

La quantification du volume de précipitations sur le site d'étude est réalisée via 2 méthodes :

La première est le suivi des précipitations à l'aide d'un pluviomètre installé au champ. Il est relevé en moyenne deux fois par semaine.

La seconde méthode est basée sur les données de précipitations enregistrées par la plateforme agrométéorologique Agromet (CRA-W). Cette plateforme météo web est destinée à la diffusion en temps réel de données agrométéorologiques à haute résolution spatiale (1Km<sup>2</sup>) et temporelle (horaire et journalière). Les données sont issues d'un réseau de stations météorologiques appartenant au réseau PAMESEB (CRA-W).

La zone d'étude est localisée à mi-distance entre 2 stations météorologiques physiques : la station de Louvain-la-Neuve et de Baisy-Thy. Les données pour l'étude sont donc générées par interpolation (moyenne de précipitations) entre ces 2 stations.

Les données obtenues via les 2 méthodes étant relativement similaires, il a été décidé d'utiliser les volumes de précipitations enregistrées par le réseau PAMESEB. En effet, la haute résolution temporelle de ces données apporte une plus grande quantité d'informations pour l'analyse des résultats.

#### 4.10 SUIVI DE LA TEMPÉRATURE DES TAS

Le suivi de la température est réalisé une fois par semaine tout au long de l'expérimentation sur les 3 tas de fumier. La température est prise à 2 profondeurs différentes dans les tas : en surface (5-10cm de profondeur) et au cœur du tas (1m de profondeur). Pour les 2 niveaux de profondeur, 3 mesures de température sont prises aléatoirement dans le tas.

Pour chaque mesure, après la mise en place de la sonde, un laps de temps de 1 minute est attendu avant d'enregistrer la température. C'est le temps nécessaire pour que la température mesurée se stabilise. Pour le tas couvert par le géotextile, 3 trous sont perforés dans la bâche de manière à y faire passer la sonde.

La mesure de la température est réalisée à l'aide d'un thermomètre numérique doté d'une sonde de 2m. Le dispositif est emprunté au CIPF qui l'utilise pour le suivi de la température des silos (*figure 21*).



Figure 21 : Thermomètre numérique et sonde de 2m

#### 4.11 SUIVI DU FRONT D'HUMECTATION DANS LES TAS

Le suivi du front d'humectation est réalisé une fois par semaine à partir du 26/11/21. La mesure est réalisée sur les deux tas de fumier qui ne font pas partie de l'expérimentation et qui sont situés dans la même zone de stockage. De cette manière, la mesure ne perturbe pas les résultats obtenus sur les 3 tas analysés.

Au départ, la méthode utilisée consiste à creuser un trou dans le tas à la pelle de manière à permettre la visualisation du front d'humectation. Les trous sont réalisés au niveau de la partie la plus haute du tas et sont décalés de 1m chaque semaine. L'évolution du front d'humectation (évolution de la zone humidifiée dans le tas) est ensuite mesurée avec un mètre.

À partir du 29/12/21, le front d'humectation est supérieur à 70cm. La méthode utilisant la pelle n'est donc plus adaptée. La visualisation du front d'humectation est donc rendue possible via le dégagement du profil du tas de fumier à l'aide d'une tarière pédologique.

## 4.12 CARACTÉRISATION DU FUMIER APRÈS STOCKAGE

### 4.12.1 Méthode d'échantillonnage et conservation

La méthode d'échantillonnage utilisée est basée sur celle mise au point par Richard Lambert et Thibaut Cugnon (L'analyse des engrais de ferme : Comment faire un bon échantillon ?, 2015).

Elle consiste à réaliser 6 prélèvements élémentaires (3 dans la couche superficielle, 2 dans la couche intermédiaire et 1 dans la couche profonde du tas) à 3 endroits différents du tas comme représenté sur la *figure 22*. À partir des 18 prélèvements élémentaires ainsi obtenus, 3 échantillons relatifs aux différentes couches du tas sont réalisés. Chaque échantillon représente une quantité d'environ 2Kg de fumier.

Les 3 tas sont échantillonnés selon cette méthode. Au total 9 échantillons sont prélevés et conservés dans une chambre froide à une température comprise entre 1°C et 4°C en attendant d'être analysés.

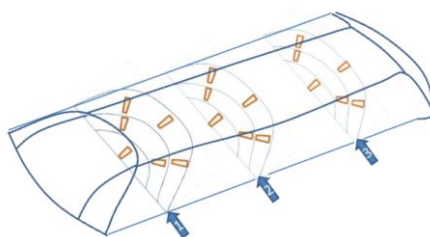


Figure 22 : Méthode d'échantillonnage de fumier selon Lambert et Cugnon 2015

### 4.12.2 Méthode d'analyse de la composition du fumier au laboratoire

La méthode est similaire à celle développée au point 4.3.3

## 4.13 MÉTHODE DE CARACTÉRISATION DES PERTES

Pour répondre aux objectifs déterminés au point 3, les résultats sont traités en 5 étapes :

1. Analyse de la composition en EM initiale du fumier
2. Analyse du lessivage et du ruissellement
3. Analyse de la composition en EM finale du fumier
4. Calcul des bilans de masse relatifs aux 3 traitements
5. Caractérisation et quantification des pertes totales en EM lors du stockage

### 4.13.1 Analyse de la composition en EM initiale du fumier

Les résultats obtenus après analyse des échantillons au laboratoire sont des teneurs en EM (Kg/Tonne de produit frais). Pour comparer les résultats obtenus sur chaque tôle, les teneurs en EM dans le fumier de départ sont converties en quantité d'EM présents dans 1

Tonne de produit sec. La quantité d'EM par tonne de produit sec est fonction de la MS du fumier de départ et est calculée via l'équation suivante :

$$\text{Quantité}_{EM} = \frac{\bar{C}}{MS} * 100 \quad (4)$$

Avec  $\text{Quantité}_{EM}$  la quantité d'EM (Kg/T de produit sec),  $\bar{C}$  la concentration moyenne en EM (Kg/Tonne de produits frais) et MS le taux de matière sèche du fumier (%).

Les teneurs moyennes en EM sont calculées via le logiciel RStudio. Une analyse de la variance est réalisée pour évaluer l'homogénéité des résultats. Les informations relatives à la composition initiale du fumier sont représentées numériquement au *tableau 2* et graphiquement à la *figure 25*.

#### 4.13.2 Analyse du lessivage et du ruissellement

Les résultats obtenus après analyse des échantillons au laboratoire sont des teneurs en EM (Kg/Tonne de produit frais). Pour comparer les résultats obtenus sur chaque tôle, les teneurs en EM sont multipliées par le volume de jus récolté. Les quantités d'EM perdus (Kg) au niveau de chaque tôle sont ainsi obtenues.

Pour comparer les pertes totales en EM par lessivage et ruissellement entre les différents traitements, les quantités d'EM perdus sont exprimées en Kg/Tonne de produit sec. Ainsi les résultats peuvent être comparés aux quantités d'EM présents dans le fumier avant et après le stockage. Les quantités totales d'EM perdus au niveau de chaque tôle sont sommées ( $\Sigma$ ). Les résultats sont analysés via une One Way ANOVA et un Duncan's test sur Rstudio. L'analyse ANOVA permet de révéler si l'effet du traitement est statistiquement significatif (probabilité,  $P < 0,05$ ). Le Duncan's test est pratiqué pour tester la séparation des moyennes ( $\bar{X}$ ) entre les traitements et isoler les moyennes des traitements significativement différents les unes des autres ( $P < 0,05$ ).

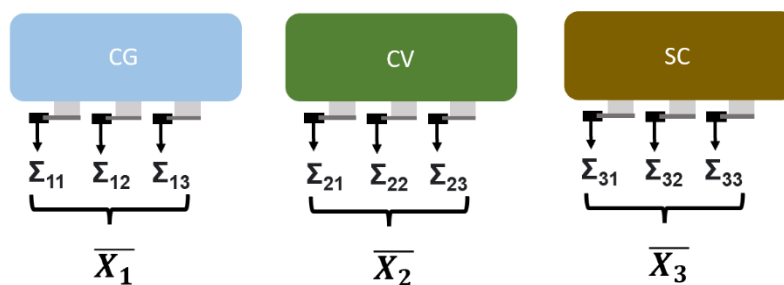


Figure 23 : Schéma illustrant la méthode de calcul des pertes moyennes en EM pour chaque traitement

$\Sigma$  et  $\bar{X}$  sont estimés en Kg/Tonne de produit frais. Cette estimation est possible suite à la modélisation et au cubage des tas de fumier réalisés au point 4.7. Les pertes moyennes en EM au niveau des 3 traitements sont représentées numériquement au *tableau 10*.

#### 4.13.3 Analyse de la composition en EM finale du fumier

Lors de l'échantillonnage, 3 échantillons ont été réalisés sur chaque traitement (cfr : 4.12.1). Chaque échantillon représente les teneurs en EM pour une couche du tas. L'analyse des résultats consiste, d'une part à comparer les teneurs en EM entre les 3 couches des tas. D'autre part elle consiste à déterminer les teneurs moyennes en EM contenues dans chacun des 3 tas.

Les résultats obtenus après analyse des échantillons au laboratoire sont des teneurs en EM (Kg/Tonne de produit frais). La comparaison des teneurs en EM (Kg/Tonne de produit sec) dans les 3 couches des tas (*figure 24*) est possible moyennant la conversion utilisée au point 4.13.1.

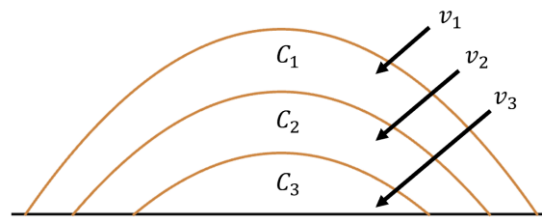


Figure 24 : Modélisation des 3 couches dans les tas de fumier

Les teneurs moyennes en EM contenues dans chacun des 3 traitements sont calculées à partir des teneurs mesurées dans les 3 différentes couches des tas. Les 3 couches sont modélisées pour les 3 tas. Le volume de fumier contenu dans chacune des couches est estimé. Et la teneur moyenne totale en EM des tas est calculée via l'équation suivante :

$$\overline{\text{Concentration}}_{\text{EM}} = \frac{v_1}{\text{Volume tas}} * C_1 + \frac{v_2}{\text{Volume tas}} * C_2 + \frac{v_3}{\text{Volume tas}} * C_3 \quad (5)$$

Avec  $\overline{\text{Concentration}}_{\text{EM}}$  la teneur moyenne en EM contenu dans le tas (Kg/Tonne de produit sec),  $v_1; v_2; v_3$  respectivement les volumes des 3 couches du tas ( $\text{m}^3$ ),  $C_1; C_2; C_3$  respectivement les teneurs en EM des 3 couches des tas (Kg/Tonnes de produit sec) et  $\text{Volume tas}$  le volume total du tas de fumier ( $\text{m}^3$ ).

#### 4.13.4 Calculs des bilans de masse relatifs aux 3 traitements

Lors du stockage de fumier, la masse des tas diminue suite aux processus de fermentation. Essentiellement suite au dégagement de  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$  du fait de l'activité microbienne.

Avant de pouvoir comparer les quantités d'EM (Kg/Tonne de produit sec) présents dans les 3 tas de fumier après le stockage. Il est donc nécessaire de prendre en compte cette variation dans l'équation de bilan de masse pour qu'elle ne fausse pas les résultats globaux.

Le bilan de masse est calculé à partir d'un EM qui n'est pas volatilisé lors du stockage et que l'on retrouve en faible concentration dans les jus de lessivage et de ruissellement. On l'appellera l'EM de référence. Si la teneur de cet EM de référence double pendant le stockage, cela signifie que le tas de fumier a perdu la moitié de sa masse. L'équation utilisée est la suivante :

$$\overline{\text{Concentration}}_{\text{EM}} = \left[ C_1 * \frac{v_1}{\text{Volume tas}} * \frac{R_{i1}}{R_{f1}} \right] + \left[ C_2 * \frac{v_2}{\text{Volume tas}} * \frac{R_{i2}}{R_{f2}} \right] + \left[ C_3 * \frac{v_3}{\text{Volume tas}} * \frac{R_{i3}}{R_{f3}} \right] \quad (6)$$

Avec  $\overline{\text{Concentration}}_{\text{EM}}$  la teneur moyenne en EM contenu dans le tas (Kg/Tonne de produit sec),  $C_1; C_2; C_3$  respectivement les teneurs en EM des 3 couches des tas (Kg/Tonnes de produit sec),  $v_1; v_2; v_3$  respectivement les volumes des 3 couches du tas ( $\text{m}^3$ ),  $\text{Volume tas}$  le volume total du tas de fumier ( $\text{m}^3$ ),  $R_{i1}; R_{i2}; R_{i3}$  respectivement les teneurs en EM de référence des 3 couches des tas avant le stockage (Kg/Tonnes de produit sec) et  $R_{f1}; R_{f2}; R_{f3}$  respectivement les teneurs en EM de référence des 3 couches des tas après le stockage (Kg/Tonnes de produit sec).

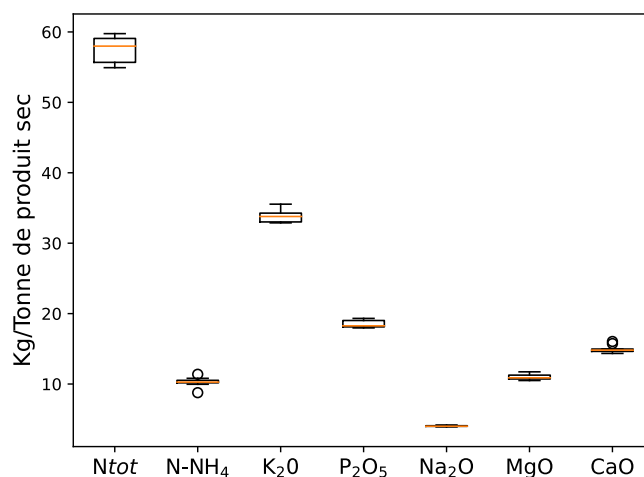
## 5 RÉSULTATS

### 5.1 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DU FUMIER AVANT LE STOCKAGE

Les propriétés physiques et chimiques du fumier avant le stockage sont listées au *tableau 2*. Les teneurs en EM [Kg/Tonne de produit sec] du fumier sont illustrées et comparées à la *figure 25*.

*Tableau 2 : Propriétés physiques et chimiques du fumier avant le stockage*

<b>Propriétés</b>		
C:N	7,9	
Densité	473,2 Kg/m <sup>3</sup>	
	<b>% de produit frais</b>	
Matière sèche	51,8	
Matière organique	42,1	
Cendres totales	7,6	
<b>Teneurs en EM</b>	<b>Kg/Tonne de produit sec</b>	<b>Kg/Tonne de produit frais</b>
Azote total (N)	57,5 ± 1,9 (avec 17.9% de N-NH <sub>4</sub> )	29,7 ± 0,8 (avec 17.9% de N-NH <sub>4</sub> )
Azote ammoniacal (N-NH <sub>4</sub> )	10,3 ± 0,7	5,3 ± 0,3
Potasse (K <sub>2</sub> O)	33,9 ± 0,9	17,6 ± 1,2
Phosphore (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	18,5 ± 0,5	9,6 ± 0,6
Sodium (Na <sub>2</sub> O)	4,0 ± 0,1	2,1 ± 0,1
Magnésie (MgO)	11,1 ± 0,4	5,7 ± 0,4
Calcium (CaO)	15,0 ± 0,6	7,8 ± 0,5



*Figure 25 : Teneurs en EM présents dans le fumier avant le stockage [Kg/Tonne de produit sec]*

## 5.2 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DU FUMIER APRÈS LE STOCKAGE

### 5.2.1 Évolution du taux de matière sèche des tas

Tableau 3 : Évolution du taux de matière sèche des tas au cours du stockage

	CG	CV	SC
<b>Avant stockage</b>	51,8	51,8	51,8
<b>Après stockage</b>			
Couche 1*	76,4	40,4	30,0
Couche 2*	64,5	43,6	42,5
Couche 3*	58,9	45,4	46,4
Tas	68,6	42,5	36,8

\*Fractionnement vertical des tas en 3 couches de  $\pm 40$ cm d'épaisseur

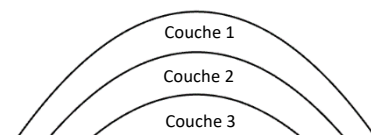


Figure 26 : Schéma représentant le fractionnement vertical des tas en 3 couches distinctes

Le *tableau 3* permet de comparer l'évolution du taux de MS au cours du stockage du fumier. Avant le stockage, le taux de MS du fumier est homogène dans les tas et s'élève à 51,8%. Au cours du stockage, l'évolution du taux de MS varie selon les traitements.

Au niveau du CG, le taux de MS augmente avec une teneur moyenne en MS de 68,6% après la période de stockage. Au sein du tas, le taux de MS augmente pour l'ensemble des couches. Il y a présence d'un gradient avec la couche extérieure qui sèche plus rapidement que la couche intérieure.

Pour le tas CV, le taux de MS moyen diminue au cours du stockage (42,5% de MS après le stockage). Il y a également présence d'un gradient entre les différentes couches du tas. Le gradient est opposé à celui observé sur le CG. La couche extérieure est plus humide que les couches intérieures.

De la même manière, le taux de MS diminue au cours du temps pour le traitement SC. Le SC est le tas qui a le taux de MS le plus faible avec 36,8% de MS sur l'ensemble du tas. Les couches 2 et 3 des tas CV et SC sont caractérisées par des teneurs en MS relativement similaires. Alors que la couche 1 a un taux de MS inférieur pour le traitement SC.

## 5.2.2 Bilan de masse

### *EM de référence*

Pour le calcul de bilan de masse,  $P_2O_5$  a été déterminé comme élément de référence. Conformément au protocole réalisé au point 4.13.4,  $P_2O_5$  ne se volatilise pas et est faiblement lessivé avec 0% de la quantité de  $P_2O_5$  présent dans le fumier avant le stockage lessivé pour le CG, 0,2% pour le CV et 0,2% pour le SC.

D'autres EM remplissent ces critères comme le MgO et le CaO. Ils sont cependant présents en moindre quantité dans le fumier de départ. Ce qui les rend moins représentatifs que le  $P_2O_5$  pour l'élaboration du calcul de bilan de masse.

### *Calcul du bilan de masse*

Tableau 4 : Tableau récapitulatif du calcul de bilan de masse par rapport au EM de référence ( $P_2O_5$ )

Traitement	$[P_2O_5]_i$ [Kg/Tonne MS]	$[P_2O_5]_f$ [Kg/Tonne MS]	$[P_2O_5]_i/[P_2O_5]_f$	Perte de masse du tas lors du stockage [%]
Géotextile (CG)	18,5	22,6	0,82	18
Couvert végétal (CV)	18,5	22,0	0,84	16
Sans couvert (SC)	18,5	25,5	0,73	27

La concentration en  $P_2O_5$  dans le fumier avant stockage est de 18,5 Kg/Tonne de MS. Au cours du stockage, la masse des tas diminue et la concentration en  $P_2O_5$  (EM non lessivé) augmente. L'augmentation de la concentration en  $P_2O_5$  est la plus importante pour le traitement SC avec 25,5 Kg/Tonne de MS après le stockage. Les concentrations en  $P_2O_5$  (Kg/Tonne de MS) après le stockage sont respectivement de 22,6 et de 22,0 pour le CG et le CV.

Selon le rapport  $[P_2O_5]_i/[P_2O_5]_f$  calculé au tableau 4, les pertes de masse au niveau des 3 traitements est de 18% pour le CG, 16% pour le CV et de 27% pour le traitement SC.

### 5.2.3 Propriétés chimiques du fumier après le stockage

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des propriétés chimiques du fumier après le stockage

Nutriments	Composition du fumier avant le stockage [Kg/Tonne de MS]	Composition du CG après le stockage [Kg/Tonne de MS]	Composition du CV après le stockage [Kg/Tonne de MS]	Composition du SC après le stockage [Kg/Tonne de MS]
N <sub>total</sub>	57,5	47,1	40,1	43,8
N-NH <sub>4</sub>	10,3	7,1	9,0	14,9
K <sub>2</sub> O	33,9	35,9	29,8	31,4
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	18,5	19,9	17,9	18,5
Na <sub>2</sub> O	4,0	4,1	3,4	3,8
MgO	11,0	11,0	11,1	11,1
CaO	15,0	17,4	19,9	15,5

Le tableau 5 permet de comparer les teneurs en EM [Kg/Tonne de produit sec] contenues dans le fumier avant et après le stockage.

La teneur en NT évolue différemment selon la méthode de stockage du fumier. Le CG est le traitement qui permet de limiter le plus de pertes en NT. En revanche, c'est au niveau du CV qu'est perdu le plus de NT. Tous types de pertes confondus : lessivage, ruissellement et volatilisation.

Dans le fumier de départ, 18% de NT est sous la forme de N-NH<sub>4</sub>. Après le stockage, le pourcentage de NT sous la forme de N-NH<sub>4</sub> est de 15% pour le CG, 22% pour le CV et de 35% pour le traitement SC.

Les résultats théoriques obtenus suite au calcul de bilan de masse indiquent une augmentation de la quantité de certains EM après le stockage pour le CG. C'est le cas pour K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Na<sub>2</sub>O et CaO. C'est également le cas pour le MgO et le CaO pour les traitements CV et SC.

#### Comparaison des teneurs en NT dans les 3 couches des tas

Tableau 6 : Comparaisons des teneurs en NT dans les 3 couches des tas

		CG	CV	SC
<b>Avant stockage</b> [Kg/Tonne de MS]		57,5 (18%)	57,5 (18%)	57,5 (18%)
	Couche 1*	43,0 (14%)	35,0 (24%)	41,1 (45%)
<b>Après stockage</b> [Kg/Tonne de MS]	Couche 2*	54,9 (14%)	44,7 (23%)	46,4 (27%)
	Couche 3*	46,5 (16%)	46,8 (18%)	47,3 (14%)
	Tas	47,1 (15%)	40,1 (23%)	43,8 (34%)

() : % de NT sous la forme de N-NH<sub>4</sub>; \*Fractionnement vertical des tas en 3 couches de ± 40cm d'épaisseur

Les teneurs en NT dans les 3 couches des tas évoluent différemment selon les traitements (*tableau 6*).

Les teneurs en NT dans les couches 1 et 3 du CG diminuent plus rapidement que dans la couche 2. Alors que le pourcentage de NT sous la forme de N-NH<sub>4</sub> est stable dans les 3 couches.

Au niveau du CV, l'NT se concentre dans les couches inférieures du tas. Le pourcentage de NT sous la forme de N-NH<sub>4</sub> est quant à lui plus important dans les couches supérieures du tas.

Au niveau du traitement SC, la tendance est similaire à celle observée sur le CV. Il y a une concentration de NT dans les couches inférieures du tas. Le pourcentage de NT sous la forme de N-NH<sub>4</sub> est particulièrement élevé dans la couche 1 (45%).

Pour les 3 traitements, la couche 1 est la moins concentrée en NT.

### Comparaison des teneurs en K<sub>2</sub>O dans les 3 couches des tas

Tableau 7 : Comparaison des teneurs en K<sub>2</sub>O dans les 3 couches des tas

		CG	CV	SC
<b>Avant stockage</b> <b>[Kg/Tonne de MS]</b>		33,9	33,9	33,9
	Couche 1*	35,9	25,5	29,4
<b>Après stockage</b> <b>[Kg/Tonne de MS]</b>	Couche 2*	37,3	34,2	32,6
	Couche 3*	33,9	34,7	34,7
	Tas	35,9	29,8	31,4

\*Fractionnement vertical des tas en 3 couches de ± 40cm d'épaisseur

L'évolution des teneurs en K<sub>2</sub>O au niveau du CG est différente de celles observées sur le CV et le SC (*tableau 7*). En effet, les teneurs théoriques en K<sub>2</sub>O ne diminuent pas dans les 3 couches pour le CG. Alors que pour le CV et le SC, les teneurs en K<sub>2</sub>O augmentent dans les couches inférieures du tas.

### Comparaison des teneurs en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dans les 3 couches des tas

Tableau 8 : Comparaison des teneurs en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dans les 3 couches des tas

		CG	CV	SC
<b>Avant stockage</b> <b>[Kg/Tonne de MS]</b>		18,5	18,5	18,5
	Couche 1*	20,2	17,3	18,4
<b>Après stockage</b> <b>[Kg/Tonne de MS]</b>	Couche 2*	20,3	18,5	19,0
	Couche 3*	18,7	18,4	17,8
	Tas	19,9	17,9	18,5

\*Fractionnement vertical des tas en 3 couches de ± 40cm d'épaisseur

Les teneurs en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> varient peu entre les différentes couches des tas (*tableau 8*).

### 5.3 ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE DES TAS AU COURS DU STOCKAGE

L'évolution de la température des tas de fumier à 1m de profondeur est illustrée à la *figure 27*. Elle évolue différemment en fonction de la méthode de stockage. Au début du stockage, la température du fumier dans les 3 tas n'est pas significativement différente ( $\pm 42^{\circ}\text{C}$ ).

Au cours du stockage la température augmente légèrement dans le fumier sous le CG (température après stockage  $\pm 46^{\circ}\text{C}$ ). Pour les traitements CV et SC, la tendance est inverse. La température diminue de manière significativement plus importante dans le fumier stocké sous le SC que sous le CV.

La température dans le fumier stocké sous le CV et le SC reste stable durant les 5 premières semaines de stockage. Elle diminue ensuite progressivement. À la fin du stockage, la température se stabilise.

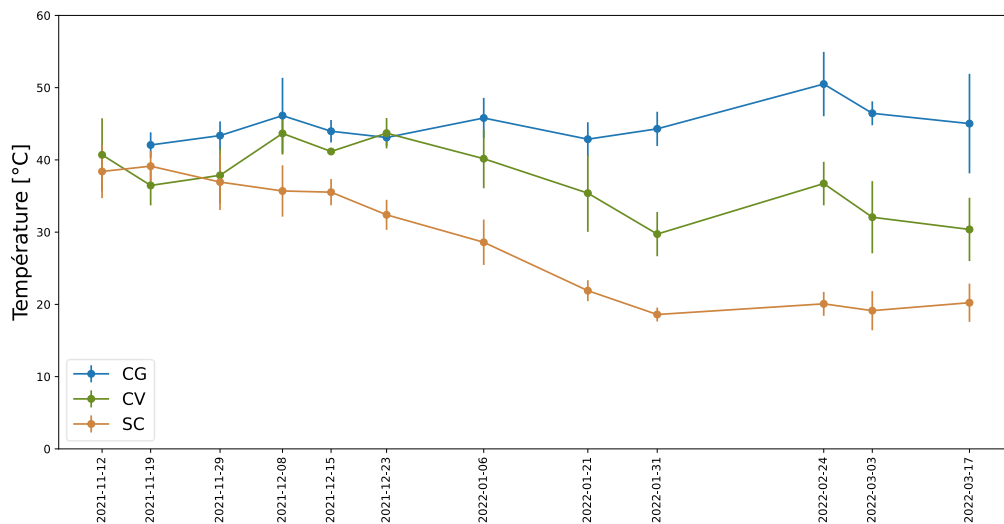


Figure 27 : Évolution de la température à 1m de profondeur pendant la période de stockage du fumier

## 5.4 CONDITIONS CLIMATIQUES PENDANT LE STOCKAGE

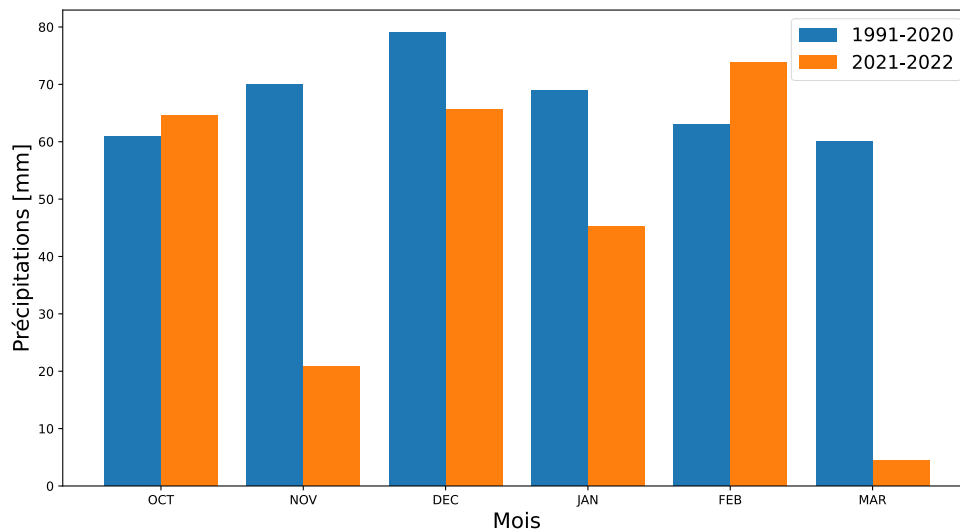


Figure 28 : Précipitations mensuelles enregistrées à Louvain-la-Neuve/Baisy-Thy pendant la période de stockage du fumier comparées aux précipitations mensuelles moyennes à Uccle entre 1991 et 2020 (Climate-data.org)

Les précipitations mensuelles enregistrées sont comparées aux normales climatiques à Uccle (1991-2021), situé à environ 20 km au nord-ouest du site d'étude (figure 28).

Les données indiquent que le volume de précipitations enregistré pendant la période de stockage du fumier est 30% inférieur au volume de précipitations moyen. Il est tombé 275mm de précipitations entre le 1<sup>er</sup> octobre 2021 et le 31 mars 2022. C'est 127L de moins que la moyenne (402mm) calculée sur la même période à Uccle.

La figure 28 indique que novembre 2021 et mars 2022 ont été 2 mois particulièrement secs. Le mois de février 2022 a été un peu plus humide que la normale.

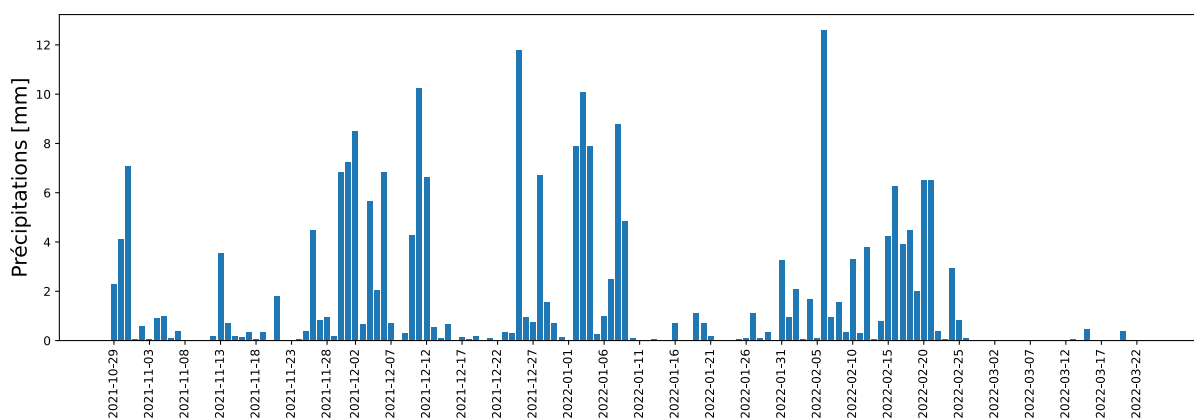


Figure 29 : Précipitations journalières pendant la période de stockage

La figure 29 indique le volume de précipitations journalier au cours de la période de stockage. 4 périodes de précipitations importantes sont identifiées : du 29/10 au 31/10 avec un cumul de 14mm, du 26/11 au 15/12 avec un cumul de 63mm, du 25/12 au 09/01 avec un cumul de 66mm et du 27/01 au 26/02 avec un cumul de 72mm.

La *figure 30* indique le cumul des précipitations au cours de la période de stockage. Pendant les 4,5 mois d'étude (29/10/21 au 22/03/22) 230mm de précipitations ont été enregistrés. Sur cette figure, les 4 périodes de précipitations importantes sont également graphiquement identifiables.

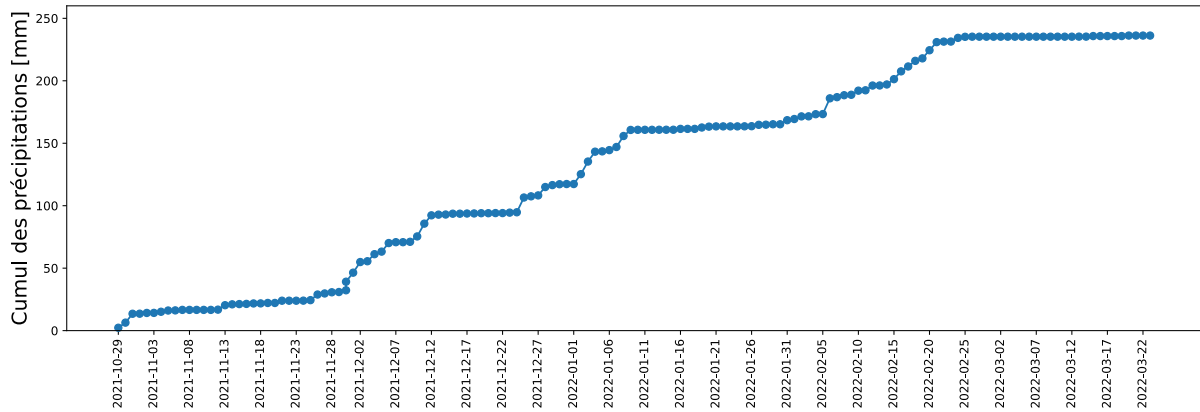


Figure 30 : Cumul des précipitations pendant la période de stockage

## 5.5 ÉVOLUTION DU FRONT D'HUMECTATION PENDANT LA PÉRIODE DE STOCKAGE

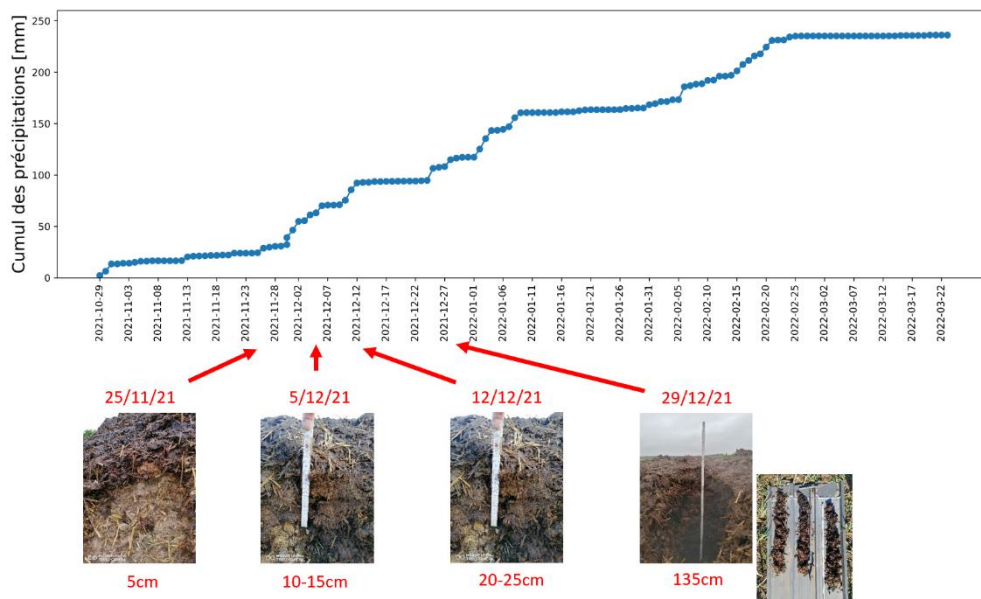


Figure 31 : Évolution du front d'humectation des tas au cours de la période de stockage parallèlement au cumul de précipitations

Pendant les 4 premières semaines de stockage, le front d'humectation des tas ne dépasse pas les 10cm (*figure 31*). À partir du 5/12/21, le front d'humectation évolue rapidement après un cumul de précipitations qui dépasse les 70L/m<sup>2</sup>. Il atteint 20 à 25cm le 12/12/21 et représente l'entièreté du tas le 29/12/21 après un cumul de précipitations >100L/m<sup>2</sup>.

## 5.6 ANALYSE DU LESSIVAGE ET DU RUISSELLEMENT

### 5.6.1 Volumes de jus récoltés

Tableau 9 : Volumes de jus récoltés en fonction de la méthode de stockage

Traitement	Volume du tas [m <sup>3</sup> ]	Surface du tas au sol [m <sup>2</sup> ]	Surface échantillonnée sous le tas [m <sup>2</sup> ]	% de la surface du tas au sol représentée par l'échantillon [%]	Volume de jus récolté [L/Tonne MS]
Géotextile (CG)	34	44	4,3	9,7	0 <sup>a</sup>
Couvert végétal (CV)	40	45	4,5	9,9	197,6 ± 39,5 <sup>b</sup>
Sans couvert (SC)	36	40	4,4	11,0	208,8 ± 38,2 <sup>b</sup>

One way Anova Signif. Codes : 0 '\*\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' ' , abcDuncan's test pour la comparaison des moyennes : les moyennes qui ont la même lettre ne sont pas significativement différentes ( $\alpha$  t-test = 0,05).

Le *tableau 9* rassemble les informations pratiques relatives aux différents tas. Le volume des tas est assez similaire avec 34m<sup>3</sup> pour le CG, 40m<sup>3</sup> pour le CV et 36m<sup>3</sup> pour le SC. La surface des tas au sol varie entre 40m<sup>2</sup> et 45m<sup>2</sup>. La surface échantillonnée sous le tas est en moyenne de 4,4m<sup>2</sup> et représente ± 10% de la surface au sol des tas.

Pendant l'entièreté de la période de stockage, aucune perte de jus n'a été enregistrée sous le tas CG. Respectivement 197,6 et 208,8L de jus ont été récoltés sous le tas CV et SC. Soit environ 28% du volume des précipitations reçues pendant cette période. Le volume de jus récolté sous le CG est significativement différent des volumes récoltés sous le CV et le SC. Pour les CV et SC, la différence entre les volumes récoltés n'est pas significativement différente.

La *figure 32* illustre graphiquement l'évolution du lessivage et du ruissellement par rapport au cumul de précipitations enregistré au cours de la période de stockage du fumier. Les premiers échantillons sont récoltés sur le CV après ± 5 semaines (06/12/21) de stockage et un cumul de précipitations de 70mm. Au total, 6 échantillons sont récoltés au cours du stockage au niveau du CV.

Le premier échantillon réalisé sur le SC est prélevé le 29/12/21 après un cumul de précipitations de 110mm. C'est-à-dire 23 jours après les premiers échantillons réalisés sur CV et ± 2 mois après le début de l'étude. Au total, 5 échantillons sont récoltés au cours du stockage au niveau du SC.

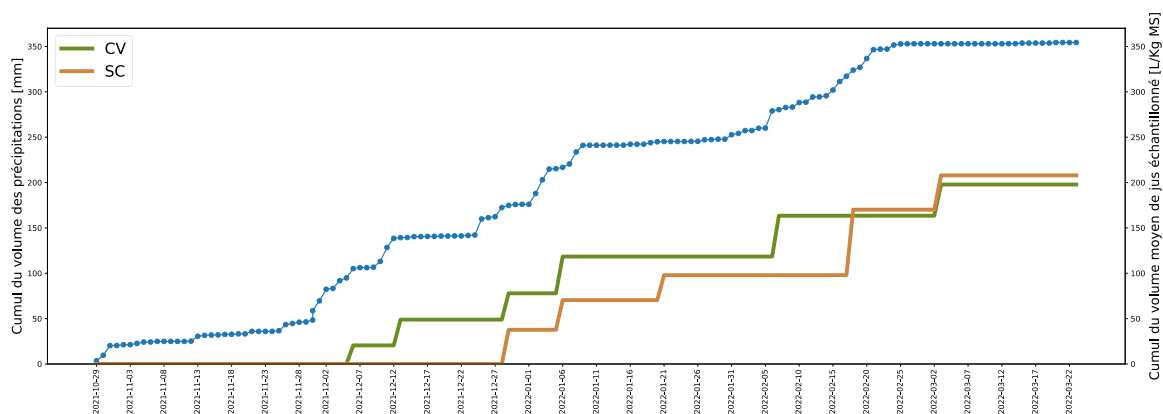


Figure 32 : Évolution du lessivage et du ruissellement comparé au cumul de précipitation enregistré au cours de la période de stockage du fumier.

## 5.6.2 Quantification des pertes en EM

Tableau 10 : Tableau récapitulatif des pertes par lessivage et ruissellement pour les principaux EM en fonction de la méthode de stockage.

Nutriments	Quantité totale lessivée CG [g/Ton de MS]	% Quantité initiale de nutriments lessivés CG	Quantité totale lessivée CV [g/Ton de MS]	% Quantité initiale de nutriments lessivés CV	Quantité totale lessivée SC [g/Ton de MS]	% Quantité initiale de nutriments lessivés SC
N <sub>total</sub>	0 <sup>a</sup>	0	321,8 ± 132,3 <sup>ab</sup>	0,6 ± 0,2	614,3 ± 434,4 <sup>b</sup>	1,1 ± 0,8
N-NH <sub>4</sub>	0 <sup>a</sup>	0	153,8 ± 114,3 <sup>a</sup> (48% de NT)	1,5 ± 1,1	317,2 ± 269,6 <sup>a</sup> (52% de NT)	3,1 ± 2,6
K <sub>2</sub> O *	0 <sup>a</sup>	0	885,6 ± 238,9 <sup>b</sup>	2,6 ± 0,7	1310,0 ± 691,9 <sup>b</sup>	3,9 ± 2,0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> *	0 <sup>a</sup>	0	38,9 ± 8,8 <sup>b</sup>	0,2 ± 0,1	41,3 ± 20,5 <sup>b</sup>	0,2 ± 0,1
Na <sub>2</sub> O *	0 <sup>a</sup>	0	96,0 ± 32,5 <sup>b</sup>	2,4 ± 0,8	143,5 ± 70,1 <sup>b</sup>	3,6 ± 1,7
MgO **	0 <sup>a</sup>	0	42,9 ± 11,0 <sup>b</sup>	0,4 ± 0,1	21,5 ± 11,2 <sup>c</sup>	0,2 ± 0,1
CaO **	0 <sup>a</sup>	0	62,5 ± 21,6 <sup>b</sup>	0,4 ± 0,1	24,5 ± 8,0 <sup>a</sup>	0,2 ± 0,1

One way Anova Signif. Codes : 0 '\*\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 ' '. abcDuncan's test pour la comparaison des moyennes : les moyennes qui ont la même lettre ne sont pas significativement différentes ( $\alpha$  t-test = 0,05).

Le *tableau 10* rassemble et compare les quantités moyennes en EM perdus par lessivage et ruissellement au cours de la période de stockage du fumier pour les différentes méthodes de stockage.

Les résultats de la One way ANOVA indiquent que l'effet du traitement est statistiquement significatif ( $P < 0,05$ ) pour tous les EM à l'exception de N-NH<sub>4</sub>.

Conformément aux résultats obtenus au *tableau 9*, aucune perte en EM par lessivage et ruissellement n'a été enregistrée au cours du stockage du fumier pour le CG.

Les pertes en NT pour le CV et le SC représentent respectivement 0,6% et 1,1% de NT initial contenu dans le fumier avant stockage. Les résultats du Duncan's test confirment que les pertes en NT sont significativement différentes entre le CG et SC. Cependant, les pertes moyennes sous le CV ne sont pas significativement différentes du CG et du SC. 48% de NT

perdu par lessivage et ruissellement est sous la forme  $N-NH_4$  pour CV et 52% pour le traitement SC.

Les pertes les plus importantes en EM sont celles liées au  $K_2O$ . 2,6% de  $K_2O$  présent avant le stockage est perdu par lessivage et ruissellement pour le CV et 3,9% pour le SC. Les pertes en  $K_2O$  ne sont pas significativement différentes entre le CV et le SC. Alors que, la quantité de  $K_2O$  perdu sous le CG est significativement différente des 2 autres traitements.

Les quantités de  $P_2O_5$ , MgO et CaO perdus par lessivage et ruissellement sont faibles pour les 3 traitements (<0,3% quantité initiale contenue dans le fumier avant stockage). Les pertes en  $P_2O_5$  sous le CG sont significativement inférieures à celles enregistrées sous le CV et le SC. La différence entre CV et SC n'est pas significative pour le  $P_2O_5$ . Concernant le MgO, les pertes moyennes sont significativement différentes pour les 3 traitements. Les pertes les plus importantes ont lieu sous le CV tandis que le CG limite totalement les pertes en MgO. Les pertes moyennes en CaO sont également plus importantes sous le CV. La quantité de CaO perdu sous le CV est significativement différente des traitements CG et SC ( $P < 0,05$ ).

Les pertes moyennes en  $Na_2O$  ne sont pas négligeables. Avec 2,4% de pertes pour le CV et 3,6% pour le SC.

La *figure 33* permet de visualiser et de comparer graphiquement les pertes moyennes en EM en fonction des différentes méthodes de stockage du fumier.

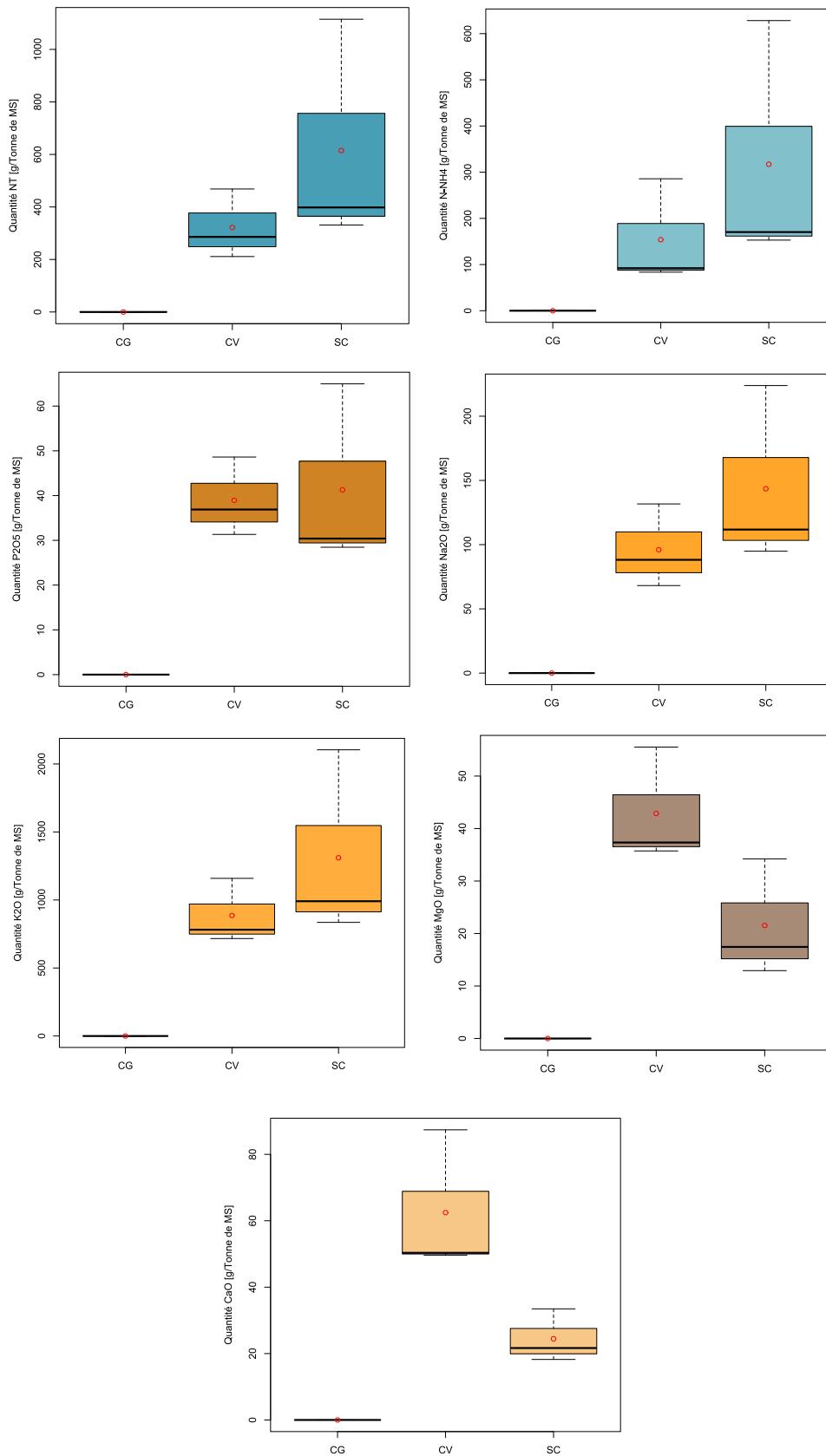


Figure 33 : Comparaison des pertes moyennes en EM pour les différentes méthodes de stockage [Kg/Tonnes de MS]

### 5.6.3 Évolution des pertes au cours du stockage

Les figures 34 et 35 illustrent l'évolution des pertes en EM au cours du stockage pour les traitements CV et SC. Au cours du stockage, les pertes par lessivage et ruissellement apparaissent d'abord au niveau du CV (06/12/2). Les premières pertes enregistrées pour le SC sont le 29/12/21. Au cours du stockage, les pertes évoluent plus rapidement au niveau du traitement SC qu'au niveau du traitement CV.

Pour les 2 traitements, l'évolution des pertes est linéaire entre le 01/01/22 et le 03/03/22. Après le 03/03/22, les quantités d'EM perdus par lessivage et ruissellement n'évoluent plus. Cette observation est similaire pour les 2 traitements.

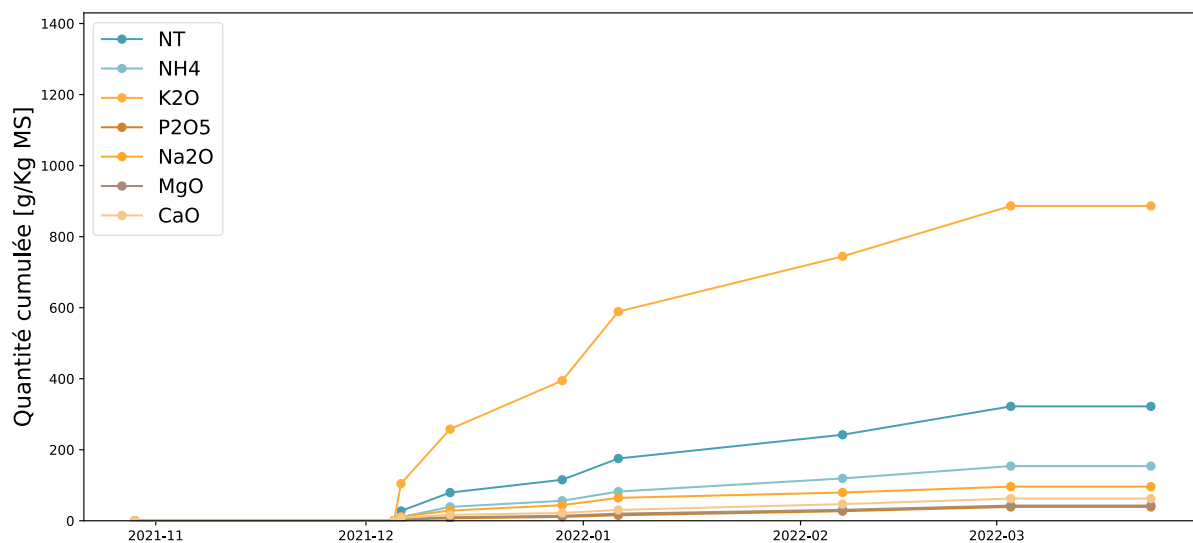


Figure 34 : Évolution des pertes en EM au cours du stockage pour le CV

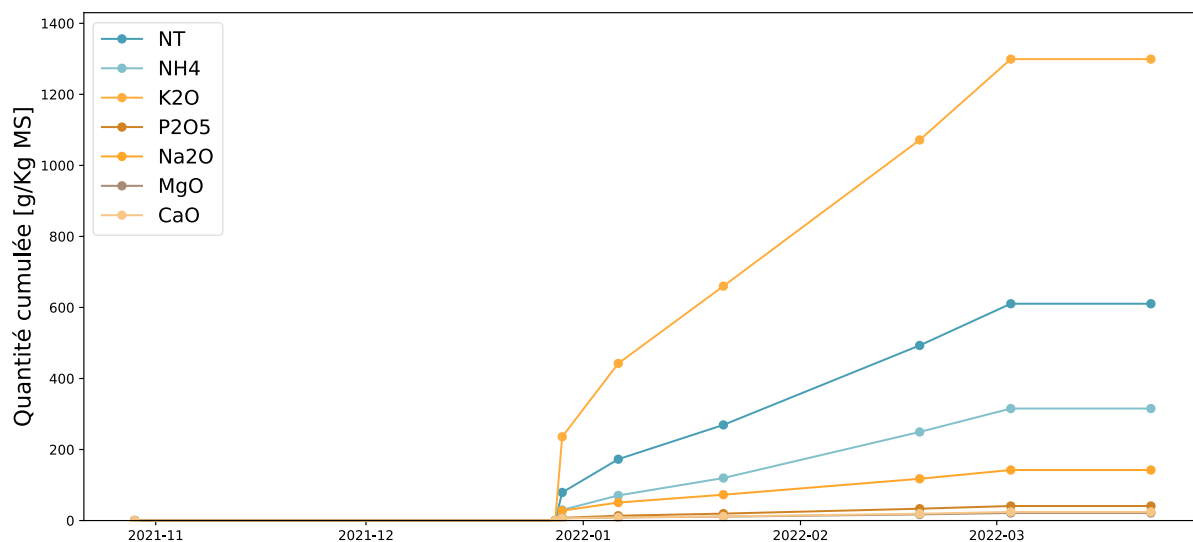


Figure 35 : Évolution des pertes en EM au cours du stockage pour le SC

## 5.7 CARACTÉRISATION DES PERTES EN NT

Le *tableau 11* rassemble les informations relatives aux pertes en NT lors de la période de stockage du fumier. Les pertes sont caractérisées en fonction de la méthode de stockage et du type de perte : lessivage-ruissellement et volatilisation.

Pour chaque méthode de stockage, le tableau est divisé en 3 sections :

-Dans la première section, les pertes totales en NT (Kg/Tonne de MS) sont calculées par rapport à la quantité en NT présent dans le fumier avant et après le stockage.

-La deuxième section caractérise les pertes en NT par lessivage et ruissellement. Les quantités en NT perdu par lessivage et ruissellement sont mesurées expérimentalement et comparées au *tableau 10*.

-Les pertes par volatilisation en NT sont caractérisées dans la section 3.

Pour chaque section, les pourcentages d'NT perdu par rapport aux quantités d'NT présent avant le stockage sont calculés. Les valeurs sont entre parenthèses dans le tableau.

*Tableau 11 : Tableau récapitulatif des différents types de pertes en NT*

Traitement	Bilan de masse	NT
CG	Quantité NT fumier départ [Kg/Ton MS] (1)	57,5
	Quantité NT fumier final [Kg/Ton MS] (2)	47,1
	Perte totale [Kg/Ton MS] (1)-(2)	10,4 (18,1)
	Quantité NT perdu par lessivage et ruissellement [Kg/Ton MS]	0,0 (0)
	Quantité NT perdu par volatilisation [Kg/Ton MS]	10,4 (18,1)
CV	Quantité NT fumier départ [Kg/Ton MS]	58,9
	Quantité NT fumier final [Kg/Ton MS]	40,1
	Perte totale [Kg/Ton MS] (1)-(2)	18,8 (32)
	Quantité NT perdu par lessivage et ruissellement [Kg/Ton MS]	0,3 (0,5)
	Quantité NT perdu par volatilisation [Kg/Ton MS]	18,5 (31,5)
SC	Quantité NT fumier départ [Kg/Ton MS]	57,5
	Quantité NT fumier final [Kg/Ton MS]	43,8
	Perte totale [Kg/Ton MS] (1)-(2)	13,7 (23,8)
	Quantité NT perdu par lessivage et ruissellement [Kg/Ton MS]	0,6 (1,1)
	Quantité NT perdu par volatilisation [Kg/Ton MS]	13,1 (22,8)

( ) : NT perdus/NT fumier de départ [%]

Les pertes en NT (tous types de pertes confondus) au cours de la période de stockage varient entre 18,1% et 32% de NT contenu dans le fumier avant le stockage (*figure 36*). Les pertes en NT par lessivage et ruissellement représentent 0%, 0,5% et 1,1% de NT contenu dans le fumier avant le stockage respectivement pour le CG, CV et le SC. Les pertes en NT par volatilisation représentent 18,1%, 31,5% et 22,8% de NT contenu dans le fumier avant le stockage respectivement pour le CG, CV et le SC.

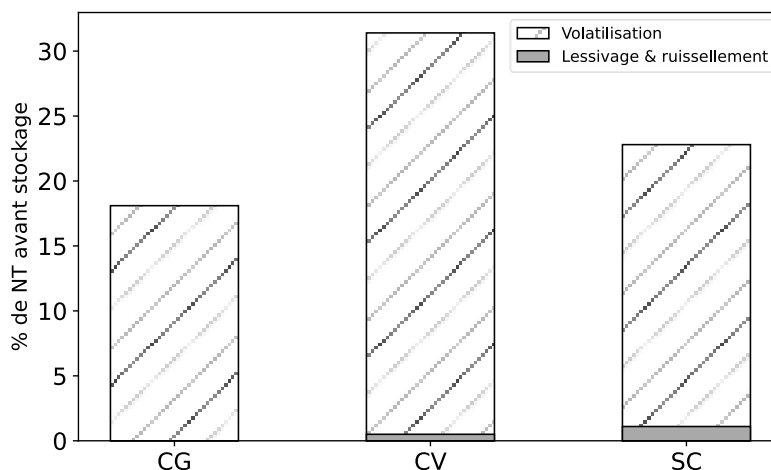


Figure 36 : Pertes en NT au cours de la période de stockage du fumier

Pour le traitement CG, 100% de NT perdu est volatilisé dans l'atmosphère. Au niveau du CV, 1,7% de NT perdu est lessivé, dont 1,3% sous la forme de N-NH<sub>4</sub>. Le reste de NT perdu est volatilisé (98,3%). 4,5% de NT perdu au niveau du traitement SC est lessivé, dont 2,3% sous la forme de N-NH<sub>4</sub>. Le NT perdu restant (95,5%) est volatilisé dans l'atmosphère.



## 6 DISCUSSION

---

### 6.1 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DU FUMIER AVANT LE STOCKAGE

Les résultats d'analyse des teneurs en EM des 9 échantillons sont homogènes (*tableau 2, figure 25*). En effet, les valeurs de déviations standards autour des moyennes sont faibles. Ce qui indique que les informations apportées par les résultats représentent une bonne approximation des teneurs en EM dans le fumier avant le stockage.

Après comparaison avec la base de données Requasud (*tableau 1*) on estime que le fumier étudié est caractéristique des fumiers de volailles produits en Wallonie. À l'exception de la teneur en CaO, 4 fois inférieure à la teneur moyenne.

Les 2 paramètres principalement identifiés dans la littérature pour limiter les pertes en EM et plus particulièrement en NT sont : le taux de MS (1) et le rapport C:N (2).

(1) Dans le fumier étudié, le taux de MS (51,8%) est légèrement supérieur à la moyenne des fumiers de volailles analysés par les laboratoires Requasud (*tableau 1*). Cette valeur est inférieure à la première condition pour pouvoir stocker un fumier de volailles au champ (55%) (cf. l'arrêté du Gouvernement wallon relatif à la gestion durable de l'azote en agriculture (13 juin 2014)). Cependant, Rotz (2004) indique qu'un taux de MS d'au moins 50% permet déjà de réduire de manière significative les pertes en NT.

(2) Le rapport C:N est relativement bas (C:N : 7,9). C'est souvent le cas lorsque l'on travaille avec du fumier de volailles. Étant donné la teneur en NT particulièrement élevée contenue dans ce type d'effluent d'élevage. Cela représente donc un risque important de perte en NT. Selon Chaudhry et al. (2013), le ratio C:N devrait être supérieur à 25.

Le fumier analysé dans cette étude est donc représentatif des fumiers produits en Wallonie. Les résultats obtenus pourront dès lors être extrapolés à l'échelle wallonne. Les conditions de stockage du fumier ne sont pas totalement optimales. Même si le taux de MS est relativement haut pour un fumier de volailles wallon. Le rapport C:N indique que des pertes en N risquent de se produire.

### 6.2 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DU FUMIER APRÈS LE STOCKAGE

#### 6.2.1 Teneurs en EM du fumier après le stockage

Les résultats obtenus au *tableau 5* nous indiquent qu'il y a bien des pertes en EM au niveau des 3 méthodes de stockage du fumier. Et que la méthode de stockage influence l'évolution des pertes en EM. Cependant, certaines valeurs sont incohérentes et demandent d'être contextualisées.

En effet, il existe 2 raisons pour expliquer qu'au *tableau 5*, les teneurs en K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Na<sub>2</sub>O, MgO et CaO sont plus élevées après le stockage qu'avant le stockage dans le fumier sous le CG.

-Premièrement, le fumier est une MO difficile à échantillonner. La composition et la taille des particules dans le fumier sont variables. C'est donc un challenge de produire des échantillons représentatifs pour l'analyse au laboratoire.

-Ensuite, pour cette étude, la méthode d'échantillonnage était différente pour le fumier avant le stockage (1) et après le stockage (2) :

(1) Les résultats de teneurs en EM pour le fumier avant le stockage sont calculés sur base de 9 échantillons prélevés dans le fumier à la sortie du poulailler. Les valeurs obtenues sont particulièrement homogènes.

(2) Les résultats de teneurs en EM du fumier après la période de stockage sont calculés par rapport à l'analyse de 3 échantillons élémentaires réalisés sur les 3 couches du tas. Et les résultats ainsi obtenus sont ensuite corrigés par rapport au bilan de masse estimé pour chacune des couches du tas (cfr 4.13.3 dans la section « Matériel et méthode »). Cette méthode permet de produire les échantillons les plus représentatifs possible du fumier sur le terrain. Cependant, elle ne permet pas de donner une information sur la variance des données puisqu'une seule analyse est réalisée sur chaque couche du tas.

Dès lors, nous estimons qu'au niveau du CG, les teneurs en  $K_2O$ ,  $P_2O_5$ ,  $Na_2O$ ,  $MgO$  et  $CaO$  à la fin du stockage sont sensiblement égales aux teneurs présentes au départ. Seule la teneur en NT a diminué lors du stockage.

Au niveau des fumiers stockés sous le CV et SC, les résultats indiquent qu'on observe bien des pertes en EM : N,  $K_2O$ ,  $P_2O_5$  et  $Na_2O$ . Alors que l'augmentation importante de la teneur en  $MgO$  dans le fumier après le stockage sous le CV est expliquée par l'ajout du compost sur le tas. En effet, la teneur en  $CaO$  dans le compost est particulièrement élevée.

### 6.2.2 Teneurs en EM différentes selon les couches des tas

Avec l'analyse des teneurs en EM dans le fumier après le stockage, nous avons pu montrer qu'il y a bien des pertes en EM lors du stockage. L'analyse des teneurs en EM dans les différentes couches des tas nous donne une indication sur le type de pertes qui ont lieu dans les tas.

Les résultats présentés au *tableau 6 – 7* indiquent de potentielles pertes par lessivage en N et  $K_2O$  pour le fumier stocké sous le CV et SC. En effet, les teneurs en N et en  $K_2O$  diminuent dans les couches supérieures du tas et se concentrent dans les couches inférieures. On observe également que le pourcentage de N sous la forme  $N-NH_4$  augmente dans les couches supérieures des tas. Ce qui indique une augmentation de l'activité microbienne et donc du taux de minéralisation dans le fumier (Pratt et al. 2002).

Au niveau des 3 types de couverts, la teneur en N dans la couche 1 du tas est la plus faible. Ce qui confirme l'hypothèse de perte par lessivage. Et qui indique également la présence de pertes en N par volatilisation vers l'atmosphère.

D'autre part, on observe peu de variation au niveau de la teneur en  $P_2O_5$  dans les différentes couches des tas. Ce qui indique un faible risque de lessivage pour  $P_2O_5$ .

Contrairement au CV et au SC, le fumier stocké sous CG ne montre pas d'indice de perte en EM par lessivage. Le pourcentage de NT sous la forme de  $N-NH_4$  reste stable dans les 3 couches du tas. Cela signifie que le taux de minéralisation est faible dans le fumier (Pratt et al. 2002).

### 6.2.3 Évolution du taux de MS des tas au cours du stockage

Pour mieux comprendre l'évolution du processus de minéralisation et de lessivage des EM dans les différents tas, nous avons analysé l'évolution du taux de MS au cours du stockage.

Les résultats sont particulièrement remarquables au niveau du CG. En effet, l'utilisation du géotextile a permis de sécher le fumier pendant le stockage. Cette observation est similaire à celle faite par les producteurs de betteraves lorsqu'ils couvrent les silos avec ce type de bâche. L'utilisation du géotextile permet de sécher l'intérieur des silos, car il laisse passer l'air, mais ne laisse pas passer l'eau. L'augmentation du taux de MS dans le tas explique le faible taux de minéralisation au niveau du CG.

Par contre, au niveau du fumier stocké sous CV et SC, on observe que le taux de MS diminue dans les tas. Cette diminution s'explique par l'entrée d'eau de précipitations lors du stockage. Le gradient du taux de MS à travers le tas est similaire à celui des teneurs en NT et  $K_2O$ . On observe également que le taux de minéralisation est plus important dans les zones du tas où l'humidité est plus importante.

Enfin, on remarque que le CV a permis de limiter la diminution du taux de MS au niveau de la première couche du tas. Cependant, lorsque l'on compare les 2 couches inférieures des tas CV et SC, on observe qu'une quantité non significative d'eau est entrée dans le tas CV. Cette observation peut s'expliquer par le fait que malgré les précautions prises lors du semis du CV, on a observé une mauvaise implantation du CV. Comme expliqué dans la partie matériel et méthode, des faisans sont venus manger les semences d'escourgeon après le semis. Un sursemis a dès lors été réalisé et protégé à l'aide de filets contre les volatiles. Cependant, le sursemis a été fait tard (24/11/21) et n'a pas eu le temps de bien recouvrir le tas avant l'hiver (*figure 37*).



Figure 37 : Photo illustrant le CV qui a poussé de manière hétérogène sur le tas malgré un sursemis

#### 6.2.4 Évolution de la température des tas au cours du stockage

Selon Koerkamp 1994 l'évolution de la température du fumier lors du stockage est liée à l'activité microbienne dans les tas. D'autre part, Pratt et al. (2002) ont démontré que plus la température des tas augmente, plus on observe de volatilisation en  $\text{NH}_3$ .

Si on applique le raisonnement de ces 2 auteurs à nos résultats. Cela signifie que l'on devrait retrouver plus de minéralisation dans le fumier stocké sous le CG. Or, cela contredit les résultats obtenus par l'analyse du fumier avant et après le stockage.

Nous estimons donc que d'autres facteurs peuvent être responsables de l'évolution de la température du fumier. Arikan et al. (2009) indiquent que la température du fumier est fonction de l'activité des micro-organismes, du taux de matière sèche, de la densité des tas, et de certains facteurs qui influencent les pertes de chaleur (forme des tas, couverts,...).

En effet, Arikan et al. (2009) ont démontré qu'ajouter de la paille sur le tas permet d'isoler le fumier et de conserver une température significativement plus élevée que dans les tas non couverts. Ces résultats peuvent expliquer pourquoi la température du fumier stocké sous le CG reste haute contrairement aux 2 autres tas. D'un côté, le CG joue ce rôle d'isolation. De l'autre, au regard du taux de MS de la couche supérieure du fumier stocké sous le CG. On peut imaginer qu'elle permette également d'isoler le reste du tas.

L'évolution de la température dans les fumiers stockés sous le CV et le SC est relativement similaire à celles observées dans d'autres études. Elle est fonction de l'activité des micro-organismes et de l'entrée d'eau dans les tas.

## 6.3 ANALYSE DU LESSIVAGE ET RUISSELLEMENT

À partir des premiers résultats basés sur l'analyse du fumier avant et après le stockage, plusieurs observations sont faites. Premièrement, on remarque des pertes en N, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Na<sub>2</sub>O au niveau des tas de fumier stockés sous CV et SC. Au niveau du CG, seules des pertes en N sont observées. Ensuite, nous avons identifié certaines propriétés du fumier indiquant l'activation des mécanismes de minéralisation, lessivage et volatilisation. Enfin, nous avons établi le lien entre ces différents mécanismes et le taux de MS mesuré dans le fumier.

Dans cette section, nous allons pouvoir confronter ces observations avec les résultats expérimentaux mesurés lors de l'analyse du lessivage et du ruissellement au champ.

### 6.3.1 Impact des conditions climatiques sur le lessivage et le ruissellement

Les résultats obtenus nous permettent d'établir un lien direct entre la quantité de lessivage-ruissellement et les conditions climatiques. Ce lien vaut pour le CV et le SC, mais pas pour le CG pour lequel nous n'avons pas enregistré de perte par lessivage et ruissellement (*tableau 9 et 10*).

En effet, pendant le mois de novembre, le front d'humectation dans les tas est resté stable ( $\pm 5$ cm). Nous estimons que cette évolution lente du front d'humectation, au début de la période de stockage, s'explique par les faibles quantités de précipitations enregistrées pendant le mois de novembre (70% sous la normale mensuelle) (*figure 28*).

À partir du mois de décembre, le front d'humectation évolue rapidement et les premiers jus liés au lessivage et ruissellement sont enregistrés (*figure 31 et 32*). Ce phénomène d'humidification des tas est alimenté par un cumul de 63mm des précipitations enregistrées pendant les 2 premières semaines de décembre. Ensuite, la production de jus reste fonction des quantités de précipitations enregistrées jusqu'à la fin de la période de stockage (*figure 32*).

Similairement aux observations faites par Marc De Toffoli et Richard Lambert dans la « Synthèse des connaissances : Le stockage du fumier et du fumier de volailles au champ, 2011 », on remarque que les volumes de jus récoltés sont faibles par rapport au volume de précipitations (26% des précipitations). Ceci s'explique essentiellement par un effet éponge du fumier.

### 6.3.2 Évolution des pertes en EM dans les jus récoltés

À la *figure 34 et 35*, on peut également observer que les quantités d'EM perdus au cours du stockage sont fonction de la quantité de précipitations. Pour le CV et le SC, les premiers EM perdus dans les jus sont mesurés en décembre. À partir du moment où les tas sont humidifiés et qu'il y a un apport régulier en eau par les précipitations, les quantités de pertes en EM suivent une évolution linéaire. Au mois de mars, cette tendance atteint un plateau. Nous estimons qu'il n'indique pas la fin du processus de minéralisation et de lessivage-

ruissellement. Il est plutôt dû aux conditions climatiques sèches enregistrées au mois de mars (*figure 28*). Seulement 6% de la quantité de précipitations attendues est tombée ce mois-là.

À la lumière de ces résultats, il est donc clair que la quantité de précipitations enregistrées au cours de la période de stockage influence directement les pertes en EM par lessivage et ruissellement pour le fumier stocké sous CV et le SC. Contrairement à l'hypothèse émise par Ritter et al. (1994), les résultats de cette étude indiquent que les pertes en EM ont bien lieu pendant la période de stockage. Et pas après l'enlèvement des tas (*figure 34 et 35*).

Les résultats montrent également que les mécanismes de lessivage et de ruissellement sont différents lors du stockage des fumiers de volailles et de bovins. En effet, les pertes en EM lors du stockage des fumiers de volailles se produisent de manière continue tout au long de la période de stockage. Ce qui n'est pas le cas lors du stockage des fumiers de bovins. Selon Dewes (1995), 60% à 90% des jus produits lors du stockage du fumier de bovins sont libérés au cours du premier mois de stockage. Ce qui représente entre 50% à 90% de l'azote total perdu par lessivage et ruissellement. L'hypothèse avancée par Dewes (1995) pour expliquer cette différence est basée sur le taux de MS et le taux de minéralisation des 2 types d'effluents d'élevages. Selon lui, couvrir les tas de fumier de bovins a un effet réduit sur le lessivage. Car le taux de MS est plus faible et que la majorité du lessivage se fait via l'eau contenue dans le tas. Alors que les fumiers de volailles sont plus secs et donc plus impactés par les volumes des précipitations reçues.

De plus, lors du stockage du fumier de bovins, 94% de l'NT perdu par lessivage est sous la forme N-NH<sub>4</sub> (Zebarth et al. 1999). Pour le fumier de volailles, cette valeur est de seulement 50%. La minéralisation est donc plus importante dans les fumiers de bovins en raison du taux de MS plus faible.

### 6.3.3 Quantité d'EM perdus lors du stockage

Les résultats expérimentaux issus de l'analyse du lessivage et du ruissellement au champ confirment les hypothèses avancées lors de l'analyse du fumier après le stockage.

Le *tableau 10* montre un effet positif du CG. Il permet de limiter significativement les pertes en EM par rapport au CV et au SC. En effet, on ne mesure pas de perte en EM par lessivage et ruissellement pour le CG. En revanche, la différence n'est pas significative entre le CV et la SC. Ce résultat est expliqué par la mauvaise implantation du CV sur le tas.

Au niveau du fumier stocké sous le CV et le SC, on a identifié la présence de 6 EM dans les jus de lessivage et de ruissellement : N, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Na<sub>2</sub>O, MgO et CaO. Les EM que l'on retrouve en plus grande quantité sont N (0,6 à 1,1% de l'azote stocké), K<sub>2</sub>O (2,6 à 3,9%) et Na<sub>2</sub>O (2,4 à 3,6%) (*tableau 10*). Les EM tels que P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MgO et CaO sont présents dans les jus à de plus faibles concentrations. Respectivement 0,2% ; 0,4% ; 0,4% de la quantité en EM présents avant le stockage pour P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MgO et CaO.

Les valeurs de pertes en EM par lessivage et ruissellement mesurées dans cette étude se situent dans les moyennes inférieures par rapport aux quantités présentées dans la littérature. Cependant elles suivent les tendances générales pour les différents EM. Sagoo et

al. (2007) et Shah et al. (2009) annoncent des pertes en N d'environ 2% et de 0,2% pour le P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Selon Zebarth et al. (1999) les pertes en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, MgO et CaO sont faibles lors du stockage du fumier au champ. Milligan et al. 2008 montrent également des pertes importantes en N et K<sub>2</sub>O. Et ils indiquent seulement de faibles pertes en P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>.

Selon les résultats obtenus dans cette étude, les quantités d'EM perdus par lessivage et ruissellement lors du stockage de fumier de volailles sont relativement similaires à celles perdues lors du stockage de fumier de bovins. Selon De Toffoli et Lambert (Synthèse des connaissances : Le stockage du fumier et du fumier de volailles au champ, 2011), entre 1 et 4% de NT présent avant le stockage est perdu par lessivage. Pour le K<sub>2</sub>O, la perte est de 8% du contenu de départ. Pour le P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, la perte est faible, seulement 0,5% du contenu de départ. Compte tenu de la faible quantité d'EM perdus, ils en ont conclu qu'il n'y a pas de problème majeur en terme de pertes en EM par lessivage et ruissellement vers l'environnement lors du stockage du fumier au champ.

#### 6.3.4 Sous-estimation des quantités EM perdus par lessivage et ruissellement

Il est tout de même important de souligner que nous suspectons une sous-estimation des quantités d'EM perdus via les mesures par le dispositif de récolte de jus mis en place sur le terrain. En effet, lorsque l'on compare les résultats de lessivage issus des données expérimentales échantillonnées sur le terrain («Quantités EM perdus par lessivage et ruissellement») avec les résultats de lessivages issus du bilan de masse théorique calculé («Pertés totales») (tableau 12). On remarque que les valeurs ne correspondent pas.

Tableau 12 : Tableau récapitulatif de la caractérisation des pertes en fonction des différents traitements

Traitement	Bilan de masse	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	CaO
CG	Quantité EM fumier départ [Kg/Ton MS] (1)	33,9	18,5	4,0	11,1	15,0
	Quantité EM fumier final [Kg/Ton MS] (2)	35,9	19,9	4,1	11,0	17,4
	Perte totale [Kg/Ton MS] (1)-(2)	-2,0 (-5,9)	-1,4 (-7,7)	-0,1 (-1,6)	0,1 (0,8)	-2,4 (-16,3)
	Quantité EM perdus par lessivage et ruissellement [Kg/Ton MS]	0,0 (0)	0,0 (0)	0,0 (0)	0,0 (0)	0,0 (0)
CV	Quantité EM fumier départ [Kg/Ton MS]	35,0	19,0	4,1	11,6	18,6
	Quantité EM fumier final [Kg/Ton MS]	29,8	17,9	3,4	11,1	19,9
	Perte totale [Kg/Ton MS] (1)-(2)	5,2 (14,8)	0,0 (0)	0,7 (17,4)	0,6 (4,8)	-1,2 (-6,5)
	Quantité EM perdus par lessivage et ruissellement [Kg/Ton MS]	0,9 (2,5)	0,0 (0)	0,1 (2,3)	0,0 (0)	0,1 (0,3)
SC	Quantité EM fumier départ [Kg/Ton MS]	33,9	18,5	4,0	11,1	15,0
	Quantité EM fumier final [Kg/Ton MS]	31,4	18,5	3,8	11,1	15,5
	Perte totale [Kg/Ton MS] (1)-(2)	2,6 (7,5)	0,0 (0)	0,2 (5,2)	0,0 (0)	-0,5 (-3,4)
	Quantité EM perdus par lessivage et ruissellement [Kg/Ton MS]	1,3 (3,9)	0,0 (0)	0,1 (3,6)	0,0 (0)	0,0 (0,2)

() : EM perdus/EM fumier de départ [%]

Pour le traitement CV, les résultats expérimentaux sont inférieurs aux résultats théoriques. La différence entre les résultats expérimentaux et théoriques est environ d'un facteur 6. À l'exception des pertes en  $P_2O_5$  (0%) similaires pour les 2 méthodes (*tableau 12*).

Pour le traitement SC, les résultats expérimentaux sont également inférieurs aux résultats théoriques. Cependant, la différence est moins importante que pour le CV. Selon le *tableau 12*, le dispositif de récolte des jus de lessivage et de ruissellement ne permet d'échantillonner que 50% de la quantité des EM réellement perdus lors du stockage.

Les 2 sources d'erreur plausibles pour expliquer les sous-estimations sont :

(1) Premièrement, un mauvais positionnement des dispositifs de récolte de jus sous les tas de fumier. Cependant, le positionnement des tôles avant la période de stockage a été réalisé de manière rigoureuse. De plus, le positionnement optimal des gouttières et des cuvelles a été vérifié chaque semaine au niveau des 9 dispositifs mis en place.

(2) Deuxièmement, il est possible que l'écoulement de l'eau sur les tas par ruissellement et dans les tas par lessivage se fasse selon des écoulements préférentiels. Dès lors, le volume et la concentration des jus de lessivage récoltés peuvent varier sensiblement.

Au terme de cette section portant sur l'analyse du lessivage et du ruissellement mesuré lors de l'étude, nous avons pu confirmer les hypothèses émises lors de l'analyse du fumier après le stockage. Nous avons également pu montrer que les pertes en EM par lessivage et ruissellement lors du stockage de fumier de volailles sont fonction de la quantité de précipitations. Les quantités d'EM perdus ont lieu tout au long du stockage. Le taux de minéralisation est plus faible dans le fumier de volailles par rapport au fumier de bovins. Même si le dispositif de récolte de jus sous-estime les pertes en EM mesurées. Les résultats indiquent que l'utilisation d'un géotextile permet d'éviter la totalité des pertes en EM par lessivage et ruissellement. Alors que nous n'avons pas pu montrer une différence significative entre les quantités de pertes en EM au niveau du CV et du SC.

## 6.4 CARACTÉRISATION DES PERTES EN N

### 6.4.1 Volatilisation de N

Les résultats obtenus dans cette étude confirment que la majorité de l'NT perdu lors du stockage se fait par volatilisation. Au niveau du fumier stocké de manière conventionnelle (SC), les pertes en N par volatilisation s'élèvent à 22,8% de l'NT stocké. Cette valeur est élevée, mais correspond sensiblement aux valeurs observées dans la littérature. Pratt et al. (2002), Rodhe and Karlsson (2002) et Nahm et K.H. (2003) ont montré que les pertes par volatilisation d'N varient entre 7% et 18% de l'N total avant le stockage.

### 6.4.2 Impact de la méthode de stockage sur la volatilisation de N

Les pertes en NT par volatilisation représentent 18,1%, 31,5% et 22,8% de l'NT contenu dans le fumier avant le stockage respectivement pour le CG, CV et le SC.

Le CG est la méthode de stockage qui permet de limiter le plus la volatilisation de NT. En effet, selon Taqui et Tam (2000) la majorité de l'N volatilisé est sous la forme de  $\text{NH}_3$  lors du stockage du fumier.  $\text{NH}_3$  est produit de manière exponentielle à partir du moment où le taux d'humidité minimum de 40% est atteint dans les tas (Vilela et al. 2020). Au niveau du fumier stocké sous le CG, le taux d'humidité est inférieur à 40% dans les 2 premières couches du tas et légèrement supérieur à 40% dans la couche 3 du tas. Avec ces informations, on peut donc confirmer les résultats de Rosa et al. (2022) qui indiquent que la volatilisation de l'N diminue lorsque le taux de MS augmente dans les tas. En effet, les résultats obtenus dans ce mémoire indiquent également que le stockage du fumier sous CG permet de limiter la volatilisation de N de 5% par rapport au SC.

En ce qui concerne le stockage du fumier sous CV, les résultats indiquent une augmentation de la perte en NT par rapport au SC. Selon Milligan et al. (2008), il existe une explication à cette observation. En effet, durant la période de stockage, la surface des tas de fumier CV et SC s'est humidifiée et a séché à plusieurs reprises. Ce qui a induit la formation d'une croûte en surface du tas SC (observée à partir du 05/02/22). Une telle croûte n'a pas été observée au niveau du fumier stocké sous CV. Le CV a donc apparemment permis d'éviter la formation de cette croûte et a ainsi contribué à maintenir l'aération et par conséquent l'activité microbienne dans le fumier. Ce qui entraîne une minéralisation et une volatilisation accrue de N.

### 6.4.3 Rapport entre lessivage, ruissellement et volatilisation de N

Les résultats obtenus dans cette étude indiquent que les pertes en N par lessivage et ruissellement sont faibles par rapport à la quantité d'N perdu par volatilisation. Seulement 1,7% à 4,5% de l'azote perdu est lessivé ou ruisselle tandis que plus de 95% est volatilisé. Ces valeurs correspondent aux mesures réalisées par De Vries et al. (2001). Selon eux, entre 0 et 10% de l'azote perdu dans l'environnement est emporté par lessivage et ruissellement alors que les 90% restant sont volatilisés.

## 6.5 ÉVALUATION DU RISQUE DE POLLUTION DE L'EAU PAR LES NITRATES LORS DU STOCKAGE DES FUMIERS DE VOLAILLES AU CHAMP

Nous allons à présent envisager l'impact en terme de lessivage d'azote du stockage des fumiers de volailles au champ provenant d'un élevage type en Wallonie de 20.000 poulets de chair.

Deux hypothèses sont envisageables pour calculer la production annuelle d'azote d'un élevage. Soit on prend la quantité de fumier produit multipliée par la teneur du fumier de volaille (méthode A). Soit on multiplie le nombre de places par la valeur de production d'azote par place (méthode B).

Méthode A, un élevage de 20.000 poulets de chair produit 173,2 tonnes de fumier par an. La valeur des fumiers de volailles est de 29,7 kg N/Tonne de matière fraîche (*tableau 2*). La quantité annuelle totale d'azote dans les fumiers est donc de 5144 kg. La superficie épanachable avec ce fumier correspondant à la norme en culture de 115 kg d'azote organique par hectare et par an est de 45 ha (= 5144/115).

Méthode B, un élevage de 20.000 poulets de chair avec production de 0,27 kg N<sup>1</sup> par place (annexe XXVI du PGDA) correspond donc à 5400 kg N/an. La superficie épanachable avec ce fumier correspondant à la norme en culture de 115 kg d'azote organique par hectare et par an est de 47 ha (= 5400/115). En 2020, une proposition d'ajustement des normes de production d'N pour les poulets de chair a été faite. Elle n'a pas encore été suivie d'un ajustement de la norme officielle du PGDA. La proposition est de passer la production annuelle pour cette catégorie de 0.27 à 0.23 kg N/place (Proposition de révision des normes d'exceptions, 2020). Cela correspondrait à 4600 Kg N/an et une superficie épanachable de 40 ha.

Si on considère 1,9 % de perte d'azote par lessivage durant le stockage (estimation la plus élevée mesurée dans cette étude pour le fumier stocké SC), on obtient une perte d'azote de 97,7 kg par an pour la méthode A et 102,6 kg (87,4Kg selon le proposition de révision 2020) par an pour la méthode B. Ramené à l'hectare épanachable avec ces fumiers, cela correspond à 2,17 kg N/ha/an pour la méthode A et 2,18 kg N/ha/an (2,19 kg N/ha/an selon la proposition de révision 2020) pour la méthode B.

Le volume correspondant au fumier produit par 20.000 poulets de chair est de 600m<sup>3</sup> pour un tas de 400m<sup>2</sup> au sol en prenant une hauteur de tas moyenne de 2 mètres. Dans l'hypothèse de pertes en azote calculées par la méthode B, la plus élevée, 102,6 kg N lessivés du fumier sur une surface de 300m<sup>2</sup> correspond à une perte de 3420 kg N/ha.

Ces exemples sont à relativiser dans la mesure où un tas de fumier de volaille ne restera que le temps nécessaire pour attendre la période d'épandage propice. Le fumier étant amené

---

<sup>1</sup> La cohérence entre les valeurs de production d'azote du poulet de chair (méthode B), de teneur en azote des effluents et de volume d'effluent produit (méthode A) a été discutée lors de la révision du PGDA (Lambert, 2006). La conclusion est que pour une densité du fumier de 300kg/m<sup>3</sup>, la production annuelle d'azote est de 0,24 kg/place ce qui correspond à la production calculée sur base du bilan d'excrétion.

au champ dans l'intervalle entre deux rondes du poulailler, il n'y aura donc pas la totalité de la production annuelle stockée pendant la durée maximale autorisée. Si un tas est épandu après 8 mois à partir du premier apport au champ, le dernier apport aura été stocké pendant environ un mois.

En considérant les hypothèses de production d'azote les plus élevées et les références les plus élevées en pertes d'azote par lessivage d'un tas de fumier de volaille vers le sol sous-jacent, nous obtenons des quantités très élevées d'azote minéral dans le sol sous le tas (plus de 3400kg N/ha). Ces chiffres sont sensiblement plus élevés que pour le fumier de bovin. Cela est dû à la teneur en azote plus importante dans le fumier de volaille et à la proportion d'azote minéral également plus élevée dans celui-ci.

Si on considère que 100% de l'azote lessivé sous les tas de fumier de volailles est transféré vers les eaux souterraines, lorsque l'on rapporte cette quantité à la surface pouvant être fertilisée avec ces effluents, cela correspond à une augmentation du lessivage de l'ordre de 2,2 kg N/ha/an. L'enrichissement important du profil sous le tas et les pertes d'azote par lessivage qui en découlent sont donc à relativiser en regard des superficies potentiellement fertilisables avec le fumier de volailles.

Cependant, il est important de ne pas sous-estimer les risques de pollutions ponctuelles sous les tas. En raison de leur viscosité, ces jus pénètrent assez difficilement dans le sol et se répartissent sur une surface supérieure à la surface du tas. Il convient pour cette raison d'éviter le stockage à proximité des eaux de surface, ouvrage de prise d'eau, piézomètres, égouts, chemins, etc.

## 6.6 PERSPECTIVES LIÉES AUX RÉSULTATS

À partir des résultats obtenus dans cette étude, différentes perspectives sont envisagées.

Tout d'abord, préconiser l'utilisation du CG lors du stockage de fumier dans des conditions de hauts risques de pollution de l'eau par les nitrates. En effet, rapportée à la surface du tas, la quantité d'azote entraîné par les jus représente 3400Kg/ha. Si les conditions optimales de stockage de fumier ne peuvent pas être assurées par l'agriculteur, nous conseillons d'utiliser un CG pour éviter toute perte par lessivage et ruissellement. De plus, si les règles relatives au stockage du fumier évoluent dans une région, l'utilisation du CG peut devenir un levier de négociation avec les agriculteurs. On peut même imaginer que l'agence de pompage finance l'achat du CG.

En outre, selon notre expérience dans cette étude, nous estimons que le CG représente une perspective plus durable que l'utilisation de bâches plastiques. En effet, à la fin du stockage du fumier, le CG a été récupéré pour être stocké dans un hangar. Comme illustré à la *figure 38*, le CG est en parfait état si il est retiré après plusieurs jours sans précipitations, le CG est sec et relativement propre. Il peut être replié sur le champ (*figure 39*) et réutilisé pendant environ 5 ans selon PYPE : Agro et Geotextile.



Figure 38 : Photo illustrant l'état du CG à la fin de la période de stockage du fumier



Figure 39 : Photo illustrant le CG replié après la période de stockage du fumier

Ensuite, toujours dans l'optique d'améliorer les méthodes de stockage du fumier. Il pourrait être intéressant d'associer le CG avec d'autres méthodes de stockage. En effet, nous avons pu montrer que le CG permet de limiter totalement les pertes en EM par lessivage et ruissellement. Cependant, il permet de limiter seulement de manière faible les pertes en N par volatilisation. Alors que la volatilisation représente plus de 90% des pertes en N.

Dans la littérature, plusieurs auteurs mettent en avant l'utilisation de bâches plastiques pour limiter les pertes par volatilisation. Chaudhry et al., (2009) ont montré que les bâches plastiques permettent de diminuer les pertes en  $\text{NH}_3$  jusqu'à 75% par rapport au stockage conventionnel car les échanges gazeux avec l'extérieur du tas sont rendus impossibles. Évidemment, l'utilisation de bâches plastiques représente des inconvénients tels que des risques d'autocombustion des tas, l'induction de réactions anaérobies responsables de la libération de gaz non désirés lors du stockage, mais également et surtout la génération de déchets. On pourrait donc imaginer associer le CG avec d'autres méthodes de stockage permettant de limiter la volatilisation de N. Par exemple l'utilisation d'amendements minéraux : soufre, aluminium, zéolites...

Finalement, même si le CV n'a pas montré de réel avantage dans cette étude, il reste de nombreux champs à explorer par rapport à cette méthode de stockage. L'expérience acquise lors de cette étude nous a permis d'identifier certains paramètres à prendre en compte lorsque l'on envisage de tels couverts. Tout d'abord, l'utilité de faire des tests de germination sur fumier de volailles, pour les différentes variétés de couverts sélectionnés. Ensuite, il serait intéressant de tester différents substrats pour assurer l'implantation du couvert sur le tas de fumier. Finalement, il est nécessaire de prendre en compte la faune présente au niveau du site de stockage. Et d'envisager une protection adaptée du couvert mis en place.

## 6.7 LIMITES DE L'ÉTUDE

Le dernier point de cette discussion concerne les limites rencontrées lors de cette étude. Elles sont présentées avec les leviers proposés pour y remédier.

Le premier levier concerne l'amélioration du dispositif de récolte de jus pour éviter une sous-estimation des quantités d'EM perdus par lessivage et ruissellement. À la lumière des résultats obtenus dans cette étude, il est conseillé d'envisager un dispositif de récolte des jus qui couvre la totalité de la surface au sol des tas de fumier. Un tel dispositif permettrait de limiter les erreurs liées aux écoulements préférentiels de l'eau dans les tas.

Le second levier aborde la méthode d'échantillonnage à la fin de la période de stockage. Il est important de réaliser minimum 3 échantillons élémentaires pour chacune des 3 couches du tas. Le calcul du bilan de masse repose sur la qualité des résultats de l'analyse de ces échantillons. Il est donc important d'avoir une information statistique sur la variance des résultats obtenus.

Finalement, pour renforcer la puissance autour du calcul du bilan de masse, il est serait intéressant d'échantillonner plusieurs tas de fumier stockés dans les mêmes conditions et au cours de la même période. Les informations ainsi générées permettraient d'identifier plus précisément l'évolution des concentrations en EM dans le fumier pendant le stockage. Et de calculer un bilan de masse sur base d'un plus grand nombre d'échantillons.

## 7 CONCLUSION

---

Au terme de cette étude, les résultats obtenus nous permettent de mieux comprendre les mécanismes responsables des pertes en EM lors du stockage de fumier de volailles. Et ainsi de répondre aux objectifs fixés au début du mémoire.

Tout d'abord, les fumiers de volailles sont caractérisés par un taux de matière sèche particulièrement élevé. Ce qui implique des mécanismes de lessivage et de ruissellement différents de ceux observés sur les fumiers de bovins. Nous avons ainsi montré que les pertes en EM par lessivage et ruissellement sont directement fonction des quantités de précipitations enregistrées pendant la période de stockage. Et que les principaux EM identifiés dans les jus sont N (dont 50% sous forme N-NH<sub>4</sub>), K<sub>2</sub>O et Na<sub>2</sub>O. Concernant les pertes en N par volatilisation, les mesures indiquent qu'elles représentent la majorité des pertes lors du stockage (>95%).

La quantification des pertes pour les différents EM analysés indique des valeurs légèrement supérieures à celles obtenues lors du stockage du fumier de bovins. Lorsque ces valeurs sont relativisées au regard des superficies pouvant être fertilisées avec le fumier, les pertes en EM correspondent à une faible augmentation du lessivage. Cependant, l'enrichissement important du profil sous le tas représente des risques de pollutions ponctuelles non négligeables.

D'autre part, les résultats relatifs aux différentes méthodes de stockage permettent de montrer qu'il y a bien un impact des différents couverts sur l'évolution des pertes en EM dans le fumier. Nous avons démontré que l'utilisation d'un CG a comme propriété de sécher les tas de fumier pendant le stockage. Ce qui permet d'éviter jusqu'à 100% des pertes par lessivage et ruissellement. De plus, l'utilisation du CG limite les pertes en N par volatilisation (5% par rapport au stockage conventionnel). Alors que suite à des problèmes rencontrés lors de l'implantation du CV, nous ne pouvons pas établir un effet significatif du CV sur l'évolution des pertes en EM par lessivage et ruissellement.

Compte tenu de ces informations, nous pouvons conclure que même si les pertes par volatilisation représentent la majorité des pertes en N. Les risques de pollutions ponctuelles sous les tas ne doivent pas être sous-estimés. Il convient, dès lors, de s'assurer du respect des législations demandant d'éviter le stockage du fumier à proximité des eaux de surface, ouvrage de prise d'eau, piézomètres, égouts, chemins, etc. Si ces conditions ne peuvent pas être assurées, nous conseillons d'utiliser un CG pour éviter toute perte par lessivage et ruissellement.

## 8 BIBLIOGRAPHIE

---

Alexis, D., Guy, F., & Benoît, G. (2021). Quelles alternatives pour les plastiques agricoles en Wallonie ? 29.

Amanullah, M. M., Somasundaram, E., Vaiyapuri, K., & Sathyamoorthi, K. (2007). POULTRY MANURE TO CROPS – A REVIEW. 28(3), 7.

Applegate, T. J., Richert, B., Sutton, A., Powers, W., & Angel, R. (s. d.). Diet and Feed Management Practices affect Air Quality from Poultry and Swine Operations. 11.

Arikan, O., Mulbry, W., Ingram, D., & Millner, P. (2009). Minimally managed composting of beef manure at the pilot scale : Effect of manure pile construction on pile temperature profiles and on the fate of oxytetracycline and chlortetracycline. *Bioresource Technology*, 100(19), 4447-4453. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.063>

Aryantha, I. P., Cross, R., & Guest, D. I. (2000). Suppression of *Phytophthora cinnamomi* in Potting Mixes Amended with Uncomposted and Composted Animal Manures. *Phytopathology*®, 90(7), 775-782. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.2000.90.7.775>

Barthès, B., Albrecht, A., Asseline, J., De Noni, G., & Roose, E. (1999). Relationship between soil erodibility and topsoil aggregate stability or carbon content in a cultivated mediterranean highland (Aveyron, France). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 30(13-14), 1929-1938. <https://doi.org/10.1080/00103629909370343>

Bhogal, A., & Shepherd, M. (1997). Effect of Poultry Manure on the Leaching of Carbon from a Sandy Soil as a Potential Substrate for Denitrification in the Subsoil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 74(3), 313-322. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199707\)74:3<313::AID-JSFA804>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199707)74:3<313::AID-JSFA804>3.0.CO;2-M)

Bicudo, J. R., & Goyal, S. M. (2003). Pathogens and manure management systems : A review. *Environmental Technology*, 24(1), 115-130. <https://doi.org/10.1080/09593330309385542>

Brady, N. C., Weil, R. R., & Weil, R. R. (2008). *The nature and properties of soils* (Vol. 13). Prentice Hall Upper Saddle River, NJ.

Butterly, C. R., Baldock, J. A., & Tang, C. (2013). The contribution of crop residues to changes in soil pH under field conditions. *Plant and Soil*, 366(1), 185-198. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1422-1>

Cai, Z., Wang, B., Xu, M., Zhang, H., He, X., Zhang, L., & Gao, S. (2015). Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China. *Journal of Soils and Sediments*, 15(2), 260-270. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0989-y>

Carpenter, S. R., Caraco, N. F., Correll, D. L., Howarth, R. W., Sharpley, A. N., & Smith, V. H. (1998). Nonpoint Pollution of Surface Waters with Phosphorus and Nitrogen. *Ecological*

Applications, 8(3), 559-568. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(1998\)008\[0559:NPOSWW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(1998)008[0559:NPOSWW]2.0.CO;2)

Chambre d'agriculture de Bretagne, Itavi. (2019). Le stockage au champ des effluents avicoles : Préconisations techniques et réglementation.

Chambre d'agriculture de BretagneItavi. (1999). Agronomie—Tout savoir sur les fumiers de volailles.

Chaudhry, A. N., Naeem, M. A., Jilani, G., Razzaq, A., Zhang, D., Azeem, M., & Ahmed, M. (2013). INFLUENCE OF COMPOSTING AND POULTRY LITTER STORAGE METHODS ON MINERALIZATION AND NUTRIENT DYNAMICS. *J. Anim. Plant Sci.*, 8.

Cui, S., Liang, S., Zhang, X., Li, Y., Liang, W., Sun, L., Wang, J., Martijn Bezemer, T., & Li, Q. (2018). Long-term fertilization management affects the C utilization from crop residues by the soil micro-food web. *Plant and Soil*, 429(1), 335-348. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3688-4>

De Vries, J. W., Aarnink, A. J. A., Groot Koerkamp, P. W. G., & De Boer, I. J. M. (2013). Life Cycle Assessment of Segregating Fattening Pig Urine and Feces Compared to Conventional Liquid Manure Management. *Environmental Science & Technology*, 47(3), 1589-1597. <https://doi.org/10.1021/es302951a>

Desloover, J., Vlaeminck, S. E., Clauwaert, P., Verstraete, W., & Boon, N. (2012). Strategies to mitigate N<sub>2</sub>O emissions from biological nitrogen removal systems. *Current Opinion in Biotechnology*, 23(3), 474-482. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2011.12.030>

de Vries, W., Kros, H., & Oenema, O. (2001). Modeled Impacts of Farming Practices and Structural Agricultural Changes on Nitrogen Fluxes in the Netherlands. *TheScientificWorldJOURNAL*, 1, 664-672. <https://doi.org/10.1100/tsw.2001.332>

Dewes, T. (1996). Effect of pH, temperature, amount of litter and storage density on ammonia emissions from stable manure. *The Journal of Agricultural Science*, 127(4), 501-509. <https://doi.org/10.1017/S0021859600078722>

Dewes, Th. (1995). Nitrogen Losses from Manure Heaps. *Biological Agriculture & Horticulture*, 11(1-4), 309-317. <https://doi.org/10.1080/01448765.1995.9754715>

Di, H. J., & Cameron, K. C. (2002). Nitrate leaching in temperate agroecosystems : Sources, factors and mitigating strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 64(3), 237-256. <https://doi.org/10.1023/A:1021471531188>

Dou, Z., Kohn, R. A., Ferguson, J. D., Boston, R. C., & Newbold, J. D. (1996). Managing Nitrogen on Dairy Farms : An Integrated Approach I. Model Description. *Journal of Dairy Science*, 79(11), 2071-2080. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(96\)76580-3](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(96)76580-3)

do Vale Barreto Figueiredo, M., do Espírito Santo Mergulhão, A. C., Sobral, J. K., de Andrade Lira Junior, M., & de Araújo, A. S. F. (2013). Biological Nitrogen Fixation : Importance, Associated Diversity, and Estimates. In N. K. Arora (Éd.), *Plant Microbe Symbiosis* :

Fundamentals and Advances (p. 267-289). Springer India. [https://doi.org/10.1007/978-81-322-1287-4\\_10](https://doi.org/10.1007/978-81-322-1287-4_10)

Eck, H. V., Winter, S. R., & Smith, S. J. (1990). Sugarbeet Yield and Quality in Relation to Residual Beef Feedlot Waste. *Agronomy Journal*, 82(2), 250-254. <https://doi.org/10.2134/agronj1990.00021962008200020015x>

Eghball, B., Wienhold, B. J., Gilley, J. E., & Eigenberg, R. A. (2002). Mineralization of manure nutrients. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57(6), 470-473. <https://www.jswconline.org/content/57/6/470>

Elmgren, R. (2002). LIVINGSTON, R. J. 2001. Eutrophication processes in coastal systems. CRC Press. 318 p. US\$100. ISBN 0-8493-9062-1. *Limnology and Oceanography*, 47(2), 612-612. <https://doi.org/10.4319/lo.2002.47.2.0612>

Estevez, B., N'Dayegamiye, A., & Coderre, D. (1996). The effect on earthworm abundance and selected soil properties after 14 years of solid cattle manure and NPKMg fertilizer application. *Canadian Journal of Soil Science*, 76(3), 351-355. <https://doi.org/10.4141/cjss96-042>

Eurostat. (2021). Overview—Agriculture—Eurostat. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/agriculture/overview>

Francis, C. A., Beman, J. M., & Kuypers, M. M. M. (2007). New processes and players in the nitrogen cycle : The microbial ecology of anaerobic and archaeal ammonia oxidation. *The ISME Journal*, 1(1), 19-27. <https://doi.org/10.1038/ismej.2007.8>

Ginting, D., Moncrief, J. F., Gupta, S. C., & Evans, S. D. (1998). Interaction between Manure and Tillage System on Phosphorus Uptake and Runoff Losses. *Journal of Environmental Quality*, 27(6), 1403-1410. <https://doi.org/10.2134/jeq1998.00472425002700060017x>

Gong, W., Yan, X., Wang, J., Hu, T., & Gong, Y. (2009). Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat–maize cropping system in northern China. *Geoderma*, 149(3), 318-324. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.12.010>

Han, I. K., Lee, J. H., Piao, X. S., & Li, D. (2001). Feeding and Management System to Reduce Environmental Pollution in Swine Production—Review -. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 14(3), 432-444. <https://www.animbiosci.org/journal/view.php?doi=10.5713/ajas.2001.432>

Haynes, R. J., & Naidu, R. (1998). Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions : A review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 51(2), 123-137. <https://doi.org/10.1023/A:1009738307837>

He, Z. L., Yang, X. E., & Stoffella, P. J. (2005). Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 19(2), 125-140. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.02.010>

- Hutson, J. L., Pitt, R. E., Koelsch, R. K., Houser, J. B., & Wagenet, R. J. (1998). Improving Dairy Farm Sustainability II : Environmental Losses and Nutrient Flows. *Journal of Production Agriculture*, 11(2), 233-239. <https://doi.org/10.2134/jpa1998.0233>
- Jarvie, H. P., Sharpley, A. N., Flaten, D., Kleinman, P. J. A., Jenkins, A., & Simmons, T. (2015). The Pivotal Role of Phosphorus in a Resilient Water–Energy–Food Security Nexus. *Journal of Environmental Quality*, 44(4), 1049-1062. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.01.0030>
- Kelleher, B. P., Leahy, J. J., Henihan, A. M., O’Dwyer, T. F., Sutton, D., & Leahy, M. J. (2002). Advances in poultry litter disposal technology – a review. *Bioresource Technology*, 83(1), 27-36. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(01\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(01)00133-X)
- Kellogg, R. L., Lander, C. H., Moffitt, D. C., & Gollehon, N. (2000). Manure nutrients relative to the capacity of cropland and pastureland to assimilate nutrients. US Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service and Agricultural Research Service.
- Kleinman, P. J. A., Sharpley, A. N., Withers, P. J. A., Bergstrom, L., Johnson, L. T., & Doody, D. G. (2015). Implementing agricultural phosphorus science and management to combat eutrophication. 14.
- Koerkamp, P. W. G. G. (1994). Review on Emissions of Ammonia from Housing Systems for Laying Hens in Relation to Sources, Processes, Building Design and Manure Handling. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 59(2), 73-87. <https://doi.org/10.1006/jaer.1994.1065>
- Kohn, R. A., Dou, Z., Ferguson, J. D., & Boston, R. C. (1997). A Sensitivity Analysis of Nitrogen Losses from Dairy Farms. *Journal of Environmental Management*, 50(4), 417-428. <https://doi.org/10.1006/jema.1997.0133>
- Komiskey, M. J., Stuntebeck, T. D., Frame, D. R., & Madison, F. W. (2011). Nutrients and sediment in frozen-ground runoff from no-till fields receiving liquid-dairy and solid-beef manures. *Journal of Soil and Water Conservation*, 66(5), 303-312. <https://doi.org/10.2489/jswc.66.5.303>
- Königer, J., Lugato, E., Panagos, P., Kochupillai, M., Orgiazzi, A., & Briones, M. J. I. (2021). Manure management and soil biodiversity : Towards more sustainable food systems in the EU. *Agricultural Systems*, 194, 103251. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103251>
- Kümmerer, K. (2009). Antibiotics in the aquatic environment – A review – Part I. *Chemosphere*, 75(4), 417-434. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.11.086>
- Lalande, R., Gagnon, B., Simard, R. R., & Côté, D. (2000). Soil microbial biomass and enzyme activity following liquid hog manure application in a long-term field trial. *Canadian Journal of Soil Science*, 80(2), 263-269. <https://doi.org/10.4141/S99-064>
- Lauer, D. A., Bouldin, D. R., & Klausner, S. D. (1976). Ammonia Volatilization from Dairy Manure Spread on the Soil Surface. *Journal of Environmental Quality*, 5(2), 134-141. <https://doi.org/10.2134/jeq1976.00472425000500020005x>

- Lazarovits, G. (2001). Management of soil-borne plant pathogens with organic soil amendments : A disease control strategy salvaged from the past. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 23(1), 1-7. <https://doi.org/10.1080/07060660109506901>
- L'Herroux, L., Roux, S. L., Appriou, P., & Martinez, J. (1997). Behaviour of metals following intensive pig slurry applications to a natural field treatment process in Brittany (France). *Environmental Pollution*, 97(1), 119-130. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(97\)00072-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(97)00072-9)
- Li, H., Liu, J., Li, G., Shen, J., Bergström, L., & Zhang, F. (2015). Past, present, and future use of phosphorus in Chinese agriculture and its influence on phosphorus losses. *AMBIO*, 44(S2), 274-285. <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0633-0>
- Liang, Q., Chen, H., Gong, Y., Yang, H., Fan, M., & Kuzyakov, Y. (2014). Effects of 15 years of manure and mineral fertilizers on enzyme activities in particle-size fractions in a North China Plain soil. *European Journal of Soil Biology*, 60, 112-119. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2013.11.009>
- Liu, J., Kleinman, P. J. A., Aronsson, H., Flaten, D., McDowell, R. W., Bechmann, M., Beegle, D. B., Robinson, T. P., Bryant, R. B., Liu, H., Sharpley, A. N., & Veith, T. L. (2018). A review of regulations and guidelines related to winter manure application. *Ambio*, 47(6), 657-670. <https://doi.org/10.1007/s13280-018-1012-4>
- Liu, S., Wang, J., Pu, S., Blagodatskaya, E., Kuzyakov, Y., & Razavi, B. S. (2020). Impact of manure on soil biochemical properties : A global synthesis. *Science of The Total Environment*, 745, 141003. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141003>
- M. De Toffoli, R. Lambert. (2011). Le stockage du fumier et du fumier de volailles au champ : Synthèse des connaissances. UCLouvain, ELI.
- Makarewicz, J. C., Lewis, T. W., Bosch, I., Noll, M. R., Herendeen, N., Simon, R. D., Zollweg, J., & Vodacek, A. (2009). The impact of agricultural best management practices on downstream systems : Soil loss and nutrient chemistry and flux to Conesus Lake, New York, USA. *Journal of Great Lakes Research*, 35, 23-36. <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2008.10.006>
- McDowell, R. W. (2016). A review of the policies and implementation of practices to decrease water quality impairment by phosphorus in New Zealand, the UK, and the US. 17.
- Mendes, L. B., Tinôco, I. de F. F., Souza, C. de F., & Saraz, J. a. O. (2012). The nitrogen cycle and loss within a broiler chicken barn : A review. *PUBVET*, 6(20). <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20133097218>
- Midgley, A. R., 1900-, Dunklee, D. E., & 1912-. (1945). Fertility runoff losses from manure spread during the winter. Agricultural Experiment Station, University of Vermont and State Agricultural College. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Fertility+runoff+losses+from+manure+spread+during+the+winter&author=Midgley%2C+A.+R.+%28Alvin+Rees%29&publication\\_year=1945](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Fertility+runoff+losses+from+manure+spread+during+the+winter&author=Midgley%2C+A.+R.+%28Alvin+Rees%29&publication_year=1945)

- Miles, D. M., Owens, P. R., & Rowe, D. E. (2006). Spatial Variability of Litter Gaseous Flux within a Commercial Broiler House : Ammonia, Nitrous Oxide, Carbon Dioxide, and Methane. *Poultry Science*, 85(2), 167-172. <https://doi.org/10.1093/ps/85.2.167>
- Milligan, E. E., Bomke, A. A., & Temple, W. D. (2008). Compost Layering Effects on Poultry Litter Leaching : A Column Study. *Compost Science & Utilization*, 16(3), 171-182. <https://doi.org/10.1080/1065657X.2008.10702375>
- Monteny, G. J., & Erisman, J. W. (1998). Ammonia emission from dairy cow buildings : A review of measurement techniques, influencing factors and possibilities for reduction. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 225-247. <https://doi.org/10.18174/njas.v46i3.481>
- Mosaddeghi, M. R., Hajabbasi, M. A., Hemmat, A., & Afyuni, M. (2000). Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. *Soil and Tillage Research*, 55(1), 87-97. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00102-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00102-1)
- Motavalli, P. P., Kelling, K. A., & Converse, J. C. (1989). First-Year Nutrient Availability from Injected Dairy Manure. *Journal of Environmental Quality*, 18(2), 180-185. <https://doi.org/10.2134/jeq1989.00472425001800020009x>
- Mottet, A., & Tempio, G. (2017). Global poultry production : Current state and future outlook and challenges. *World's Poultry Science Journal*, 73(2), 245-256.
- Myszograj, S., & Puchalska, E. (2012). Waste from rearing and slaughter of poultry – treat to the environment or feedstock for energy. *Medycyna Środowiskowa*, 15(3). <http://www.environmed.pl/Odpady-z-chowu-i-uboju-drobieu-zagrozenie-dla-srodowiska-czy-surowiec-do-produkcji,114494,0,2.html>
- Nahm, K. H. (2003). Evaluation of the nitrogen content in poultry manure. *World's Poultry Science Journal*, 59(1), 77-88. <https://doi.org/10.1079/WPS20030004>
- Nyakatawa, E. Z., Reddy, K. C., & Sistani, K. R. (2001). Tillage, cover cropping, and poultry litter effects on selected soil chemical properties. *Soil and Tillage Research*, 58(1), 69-79. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(00\)00183-5](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(00)00183-5)
- Oenema, O., & Tamminga, S. (2005). Nitrogen in global animal production and management options for improving nitrogen use efficiency. *Science in China Series C: Life Sciences*, 48(2), 871-887. <https://doi.org/10.1007/BF03187126>
- Pascale, P., Marc, D. T., & Richard, L. (2020). REJETS AZOTES DES PORCS ET VOLAILLES EN WALLONIE : PROPOSITION DE REVISION DES NORMES D'EXCRETION. 32.
- Pimpini, F., Giardini, L., Borin, M., & Gianquinto, G. (1992). Effects of poultry manure and mineral fertilizers on the quality of crops. *The Journal of Agricultural Science*, 118(2), 215-221. <https://doi.org/10.1017/S0021859600068817>
- Pratt, E. V., Rose, S. P., & Keeling, A. A. (2006). Reducing gaseous nitrogen loss from stored laying hen manure by the addition of carbohydrates. *British Poultry Science*, 47(2), 103-109. <https://doi.org/10.1080/00071660600610500>

Production agricole—Consommation de viande—OCDE Data. (2020). theOECD.  
<http://data.oecd.org/fr/agroutput/consommation-de-viande.htm>

R. Lambert, T. Cugnon. (2015). Analyse des engrais de ferme : Comment faire un bon échantillon? UCLouvain, Centre de Michamps.

R.a, Y., & R.f, H. (1977). Winter-applied manure : Effects on annual runoff, erosion, and nutrient movement. *Journal of Soil and Water Conservation*.  
[https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Winter-applied+manure%3A+Effects+on+annual+runoff%2C+erosion%2C+and+nutrient+movement.&author=Young+R.A.&publication\\_year=1977](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Winter-applied+manure%3A+Effects+on+annual+runoff%2C+erosion%2C+and+nutrient+movement.&author=Young+R.A.&publication_year=1977)

Risse, L. M., Cabrera, M. L., Franzluebbers, A. J., Gaskin, J. W., Gilley, J. E., Killorn, R., Radcliffe, D. E., Tollner, W. E., & Zhang, H. (s. d.). Land Application of Manure for Beneficial Reuse. 36.

Ritter, W. F., Chirnside, A. E. M., & Scarborough, R. W. (1994). Nitrogen movement in poultry houses and under stockpiled manure. *American Society of Agricultural Engineers. Meeting (USA)*.  
[https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Nitrogen+movement+in+poultry+houses+and+under+stockpiled+manure&author=Ritter%2C+W.F.+%28University+of+Delaware%2C+Newark%2C+DE.%29&publication\\_year=1994](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Nitrogen+movement+in+poultry+houses+and+under+stockpiled+manure&author=Ritter%2C+W.F.+%28University+of+Delaware%2C+Newark%2C+DE.%29&publication_year=1994)

Ritz, C. W., Fairchild, B. D., & Lacy, M. P. (2004). Implications of Ammonia Production and Emissions from Commercial Poultry Facilities : A Review. *Journal of Applied Poultry Research*, 13(4), 684-692. <https://doi.org/10.1093/japr/13.4.684>

Roberts, R. J., & Clanton, C. J. (s. d.). SURFACE SEAL HYDRAULIC CONDUCTIVITY AS AFFECTED BY LIVESTOCK MANURE APPLICATION. *TRANSACTIONS OF THE ASAE*, 43, 12.

Rodhe, L., & Karlsson, S. (2002). SE—Structures and Environment : Ammonia Emissions from Broiler Manure — Influence of Storage and Spreading Method. *Biosystems Engineering*, 82(4), 455-462. <https://doi.org/10.1006/bioe.2002.0081>

Rosa, E., Arriaga, H., & Merino, P. (2022). Strategies to mitigate ammonia and nitrous oxide losses across the manure management chain for intensive laying hen farms. *Science of The Total Environment*, 803, 150017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150017>

Rotz, C. A. (2004). Management to Reduce Nitrogen Losses in Animal Production. *Journal of animal science*, 82 E-Suppl, E119-137. [https://doi.org/10.2527/2004.8213\\_supplE119x](https://doi.org/10.2527/2004.8213_supplE119x)

Sagoo, E., Williams, J. R., Chambers, B. J., Boyles, L. O., Matthews, R., & Chadwick, D. R. (2007). Integrated management practices to minimise losses and maximise the crop nitrogen value of broiler litter. *Biosystems Engineering*, 97(4), 512-519.  
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.032>

Salim, H. M., Patterson, P. H., Ricke, S. C., & Kim, W. K. (2014). Enhancement of microbial nitrification to reduce ammonia emission from poultry manure : A review. *World's Poultry Science Journal*, 70(4), 839-856. <https://doi.org/10.1017/S0043933914000890>

Satbel. (2021). Agriculture & pêche | Statbel. <https://statbel.fgov.be/fr/themes/agriculture-peche>

Shah, S. B., Hutchison, K. J., Hesterberg, D. L., Grabow, G. L., Huffman, R. L., Hardy, D. H., & Parsons, J. T. (2009). Leaching of Nutrients and Trace Elements from Stockpiled Turkey Litter into Soil. *Journal of Environmental Quality*, 38(3), 1053-1065.

<https://doi.org/10.2134/jeq2007.0639>

Sharpley, A. N., Bergstrom, L., Aronsson, H., Bechmann, M., Bolster, C. H., Borling, K., Djodjic, F., Jarvie, H. P., Schoumans, O. F., Stamm, C., Tonderski, K. S., Ulen, B., Uusitalo, R., & Withers, P. J. A. (2015). Future agriculture with minimized phosphorus losses to waters : Research needs and direction. 17.

Sommer, S. G., & Hutchings, N. (1995). Techniques and strategies for the reduction of ammonia emission from agriculture. *Water, Air, and Soil Pollution*, 85(1), 237-248.

<https://doi.org/10.1007/BF00483704>

SPW. (2022). Cheptel avicole. [https://etat-agriculture.wallonie.be/contents/indicatorsheets/EAW-A\\_II\\_c\\_5.html](https://etat-agriculture.wallonie.be/contents/indicatorsheets/EAW-A_II_c_5.html)

Swelum, A. A., El-Saadony, M. T., Abd El-Hack, M. E., Abo Ghanima, M. M., Shukry, M., Alhotan, R. A., Hussein, E. O. S., Suliman, G. M., Ba-Awadh, H., Ammari, A. A., Taha, A. E., & El-Tarabily, K. A. (2021). Ammonia emissions in poultry houses and microbial nitrification as a promising reduction strategy. *Science of The Total Environment*, 781, 146978.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146978>

Tiquia, S. M., & Tam, N. F. Y. (2000). Fate of nitrogen during composting of chicken litter. *Environmental Pollution*, 110(3), 535-541. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(99\)00319-X](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(99)00319-X)

Toptex pour compost. (s. d.). Pype Agro & Geotextiles. Consulté 31 août 2021, à l'adresse <http://webshop.pypeagt.be/fr/toptex-pour-compost>

van Horne, P. L. M., Brake, J., & Williams, C. M. (1998). Economics of Controlling Ammonia Emission from Commercial Layer Farms1. *Journal of Applied Poultry Research*, 7(1), 61-68.

<https://doi.org/10.1093/japr/7.1.61>

Vilela, M. D. O., Gates, R. S., Souza, C. D. F., Teles Junior, C. G. de S., & Sousa, F. C. (2020). Nitrogen transformation stages into ammonia in broiler production : Sources, deposition, transformation and emission to environment. *DYNA*, 87(214), 221-228.

<https://doi.org/10.15446/dyna.v87n214.83318>

Vories, E. D., Costello, T. A., & Glover, R. E. (2001). Runoff from Cotton Fields Fertilized with Poultry Litter. *Transactions of the ASAE*.

<http://elibrary.asabe.org/azdez.asp?JID=3&AID=7032&CID=t2001&v=44&i=6&T=1&redirType=>

Wetselaar, R., Passioura, J. B., & Singh, B. R. (1972). Consequences of banding nitrogen fertilizers in soil. *Plant and Soil*, 36(1), 159-175. <https://doi.org/10.1007/BF01373466>

Whalen, J. K., Chang, C., Clayton, G. W., & Carefoot, J. P. (2000). Cattle Manure Amendments Can Increase the pH of Acid Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 64(3), 962-966. <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.643962x>

Wrage, N., Velthof, G. L., van Beusichem, M. L., & Oenema, O. (2001). Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(12), 1723-1732. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(01\)00096-7](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(01)00096-7)

Xie, R., & MacKenzie, A. F. (1986). Urea and Manure Effects on Soil Nitrogen and Corn Dry Matter Yields. *Soil Science Society of America Journal*, 50(6), 1504-1509. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000060025x>

Yang, Y., Tilman, D., Furey, G., & Lehman, C. (2019). Soil carbon sequestration accelerated by restoration of grassland biodiversity. *Nature Communications*, 10(1). Scopus. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-08636-w>

Young, R. A., & Mutchler, C. K. (1976). Pollution Potential of Manure Spread on Frozen Ground. *Journal of Environmental Quality*, 5(2), 174-179. <https://doi.org/10.2134/jeq1976.00472425000500020013x>

Zebarth, B. J., Paul, J. W., & Chipperfield, K. (1999). Nutrient losses to soil from field storage of solid poultry manure. *Canadian Journal of Soil Science*, 79(1), 183-190. <https://doi.org/10.4141/S98-050>

Zhang, J., Yang, J., Yao, R., Yu, S., Li, F., & Hou, X. (2014). The Effects of Farmyard Manure and Mulch on Soil Physical Properties in a Reclaimed Coastal Tidal Flat Salt-Affected Soil. *Journal of Integrative Agriculture*, 13(8), 1782-1790. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60530-4](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60530-4)

Zifei Liu, Lingjuan Wang, David B. Beasley. (2006). A Review of Emission Models of Ammonia Released from Broiler Houses. Paper Number 064101, 2006 ASAE Annual Meeting . (Doi: 10.13031/2013.21568) @2006. <https://doi.org/10.13031/2013.21568>



# Pertes en éléments minéraux lors du stockage de fumier de volailles au champ

Mascart Simon

Avec l'augmentation importante de l'élevage, les préoccupations sociétales et environnementales sur les impacts des effluents d'élevage se multiplient. La plupart des pays développés mettent en place des régulations pour contrôler la conduite de ces co-produits. En Europe, la Directive sur les nitrates et la Directive-cadre sur l'eau ont été mises en place. Les différents pôles de recherche agronomique sont donc sollicités pour mettre au point ces directives.

Dans ce mémoire nous avons quantifié les pertes en éléments minéraux par lessivage, ruissellement et volatilisation lors du stockage du fumier de volailles au champ. Trois méthodes de stockage différentes ont été comparées : stockage conventionnel (sans couvert), stockage sous couvert végétal et stockage sous couvert géotextile.

Des dispositifs de récolte des jus de lessivage et de ruissellement ont été mis en place sous les 3 tas pour suivre l'évolution des pertes en éléments minéraux tout au long de la période de stockage.

Nous avons montré que les principaux éléments minéraux perdus par lessivage et ruissellement sont N, K et Na. Les pertes par lessivage étaient significativement plus faibles dans les conditions de stockage sous le couvert géotextile. Alors que nous n'avons pas pu démontrer un effet significatif du couvert végétal sur la réduction des pertes en éléments minéraux.

Les résultats de ce mémoire indiquent que les pertes par volatilisation représentent la majorité des pertes en N (>95%). Cependant, les risques de pollutions ponctuelles sous les tas par lessivage et ruissellement ne doivent pas être sous-estimés. Il convient, dès lors, de s'assurer du respect des législations demandant d'éviter le stockage du fumier à proximité des eaux de surface, ouvrage de prise d'eau, piézomètres, égouts, chemins, etc. Si ces conditions ne peuvent pas être assurées, nous conseillons d'utiliser un couvert géotextile pour éviter toute perte par lessivage et ruissellement.