



Rapport final

Développement des connaissances sur la fonction de l'agrométéorologie sur l'épandage du fumier et la réduction des émissions de GES

Date : 28 janvier 2026

Responsable scientifique : Patrick Brassard, ing., Ph. D.

Ce rapport a été produit à l'attention de :

Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec



À l'IRDA, on **collabore**, on se **questionne**, on **explore** et on **progresses** ensemble dans la même direction : celle d'une agriculture saine, dynamique et performante.

Nous sommes des **scientifiques**, mais aussi des **gens de terrain** qui **collaborent** avec l'ensemble du milieu agricole.

Notre mission consiste à innover en agroenvironnement pour créer ensemble la production agricole de demain. Consulter le www.irda.qc.ca pour en connaître davantage sur l'Institut et ses activités.

Question ou commentaire

Patrick Brassard, ing., Ph. D.

Chercheur

Responsable scientifique et auteur principal

T : 418-643-2380 p. 601

patrick.brassard@irda.qc.ca

Auteurs du rapport

Patrick Brassard, ing. IRDA

Laura Mila Saavedra, M.sc., IRDA

Joanie St-Gelais, agr., IRDA

Stéphane Godbout, ing., agr., Ph. D., IRDA

Équipe de réalisation

Patrick Brassard, ing. IRDA

Laura Mila Saavedra, M. sc., IRDA

Joanie St-Gelais, agr., IRDA

Stéphane Godbout, ing., agr., Ph. D., IRDA

Collaborateurs

Sébastien Rougerie-Durocher, M. Sc.,

Mylène Marchand-Roy, agr., M. Sc.

Merci à notre partenaire financier

Ce projet est réalisé grâce au soutien financier du gouvernement du Québec dans le cadre du programme d'appui à la lutte contre les changements climatiques dans le secteur bioalimentaire, qui découle du Plan pour une économie verte 2030.

Dans le cadre de la réalisation de ce rapport, des outils d'intelligence artificielle ont été utilisés à des fins de recherche bibliographique, de synthèse et de reformulation.

Ce rapport peut être cité comme suit :

Brassard, P., L. Mila Saavedra, J. St-Gelais et S. Godbout. 2026. Développement des connaissances sur la fonction de l'agrométéorologie sur l'épandage du fumier et la réduction des émissions de GES. Rapport final. IRDA et MAPAQ. 43 pages.

© Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA)

Résumé

L'épandage des engrais organiques demeure une pratique incontournable en agriculture, tout en constituant une source majeure de pertes d'éléments nutritifs, notamment sous forme d'ammoniac (NH_3) et de gaz à effet de serre (GES), en particulier le protoxyde d'azote (N_2O). Dans un contexte de changements climatiques et d'objectifs gouvernementaux visant l'optimisation de la fertilisation azotée, le choix du moment d'épandage apparaît comme un levier clé pour améliorer l'efficacité des fertilisants tout en réduisant leurs impacts environnementaux. Cette réflexion s'inscrit dans l'approche des « 6B », qui vise une utilisation responsable et durable des intrants en appliquant le bon produit, de la bonne source, à la bonne dose, au bon moment, au bon endroit et avec la bonne méthode.

Dans le cadre de ce projet, une revue approfondie des connaissances scientifiques a été menée afin d'évaluer l'influence des conditions météorologiques sur les pertes d'azote lors de l'épandage de fumier et de lisier. L'accent a été mis sur les principaux mécanismes de pertes gazeuses, à savoir la volatilisation de l'ammoniac et la dénitrification, ainsi que sur l'interaction de ces mécanismes avec les facteurs météorologiques (température, rayonnement solaire, vent, humidité, précipitations et cycles de gel-dégel), les caractéristiques des sols, les propriétés des fertilisants et les techniques d'application.

L'étude met en évidence que les premières heures suivant l'épandage sont déterminantes pour les pertes par volatilisation. Des conditions météorologiques telles que des températures élevées, un fort rayonnement et une vitesse de vent élevée augmentent les émissions de NH_3 . À l'inverse, des épandages réalisés en soirée, par temps frais, avec une humidité relative plus élevée ou précédant des précipitations modérées, permettent de réduire ces pertes. L'étude souligne également l'importance de combiner les informations agrométéorologiques avec d'autres facteurs agronomiques et réglementaires afin d'appuyer la prise de décision. Il est ainsi essentiel de disposer de données fiables, représentatives à l'échelle locale et accessibles, provenant de stations publiques, privées ou de sources spécialisées comme Agrométéo Québec.

Enfin, les constats issus de la littérature et des consultations du milieu ont servi de base au développement d'un outil d'aide à la décision pratique et accessible visant à soutenir les producteurs et les conseillers dans la planification des épandages, en tenant compte des risques environnementaux et des réalités opérationnelles.

Table des matières

1	Introduction	1
2	Objectifs du projet	1
2.1	Objectif général.....	1
2.1.1	Objectifs spécifiques	1
3	Revue de littérature	1
3.1	Mise en contexte.....	1
3.2	Problématique.....	3
3.3	Cadre réglementaire	4
3.4	Recommandations des agronomes.....	4
3.5	Facteurs autres que météorologiques à prendre en compte pour le moment d'épandage	4
3.5.1	Disponibilité de la main-d'œuvre et des équipements.....	4
3.5.2	Restrictions imposées par les pratiques d'entreposage.....	5
3.5.3	Synchronisation avec les besoins de la plante	5
3.5.4	Propriétés physiques des sols	5
3.5.5	Présence de cultures ou résidus de culture.....	5
3.5.6	Caractéristiques de la matière organique épandue	5
3.6	Mécanismes causant les pertes d'azote et impact des conditions météorologiques	6
3.6.1	Le cycle de l'azote.....	6
3.6.2	La volatilisation de l'azote sous forme d'ammoniac (NH ₃).....	6
3.6.2.1	Processus de volatilisation.....	6
3.6.2.2	Méthodes de mesure et d'estimation	8
3.6.2.2.1	La méthode des enceintes fermées	8
3.6.2.2.2	La covariance des tourbillons.....	8
3.6.2.2.3	La méthode du gradient aérodynamique (AGM)	8
3.6.2.2.4	Modèle stochastique lagrangien inversé (bLS).....	9
3.6.2.2.5	Modèle FIDES (Flux Interpretation by Dispersion and Exchange over the Short-range).....	9
3.6.2.2.6	ZINST (modèle instationnaire de Zurich).....	9
3.6.2.3	Impact des facteurs météorologiques sur la volatilisation de l'azote des engrais organiques.....	9
3.6.2.4	Le projet européen ALFAM2 sur la volatilisation de l'azote.....	12
3.6.2.4.1	Aperçu général	12
3.6.2.4.2	La base de données ALFAM2.....	12
3.6.2.4.3	Modèle ALFAM2	12
3.6.3	Les émissions de N ₂ O	13
3.6.3.1	Processus de dénitrification	13
3.6.3.2	Modélisation des émissions de N ₂ O	13
3.6.3.3	Facteurs influençant les émissions de N ₂ O	14
3.6.4	Ruissellement et lessivage de l'azote	14
3.7	Mécanismes causant les pertes de phosphore et impact des conditions météorologiques	15
3.7.1	Le cycle du phosphore	15
3.7.1	Mécanismes causant les pertes de phosphore.....	16
3.7.1.1	Ruissellement	16
3.7.1.2	Lessivage.....	17

3.7.1.3	Érosion du sol	18
3.8	Sources de données météorologiques à l'échelle du marché.....	19
3.8.1	Stations météorologiques	19
3.8.2	Réseaux météorologiques existants au Canada.....	19
3.8.2.1	Stations publiques	19
3.8.2.2	Stations privées	20
3.8.2.3	Autres sources de données météorologiques ou climatiques.....	20
3.8.3	Données climatiques.....	20
4	Consultations des acteurs du milieu	21
4.1	Professionnels du milieu	21
4.2	Producteurs agricoles.....	22
5	Outil d'aide à la décision (OAD).....	23
5.1	Élaboration de l'OAD	23
5.2	Description de l'OAD	24
6	Conclusion.....	25
7	Références.....	27
	Annexe 1.....	32
	Annexe 2.....	33
	Annexe 3.....	34
	Annexe 4.....	35
	Annexe 5.....	43

Liste des figures

Figure 1. Répartition des émissions de GES au Québec, en 2023, par secteur d'activité. Tiré de MELCCFP (2025).	2
Figure 2. Répartition des émissions de GES en agriculture en 2023. Tiré de MELCCFP (2025).	2
Figure 3. Voies des pertes d'azote lors de l'épandage (tiré de Rochette et al. (2013)).....	3
Figure 4. Cycle de l'azote (tiré de Brouquisse R. et Puppo A. (2019)).....	6
Figure 5. La volatilisation de l'ammoniac et les équilibres entre les différentes formes d'azote ammoniacal dans le système sol-atmosphère. Tiré de Rochette (2008).	8
Figure 6. Structure du modèle d'émission d'ammoniac ALFAM2 (Adapté de Hafner et al., 2019).	13
Figure 7. Coefficient d'émissions de N ₂ O en fonction des précipitations pendant la saison de croissance (P) dans les sols de texture fine, moyenne et grossière. Tiré de ECCC (2025).	14
Figure 8. Cycle du phosphore (Tiré de UNIFA, 2024).	16
Figure 9. Simulation des émissions cumulées de NH ₃ à 12 et 72 h après l'épandage de lisier de porc sans incorporation (modèle ALFAM2).....	24
Figure 10. Effet de l'incorporation immédiate sur les émissions cumulées de NH ₃ à 12 et 72 h après l'épandage de lisier de porc (modèle ALFAM2).	24

1 Introduction

L'épandage d'engrais organiques et minéraux demeure une pratique essentielle en production agricole, et la responsabilité de déterminer le moment optimal pour réaliser cette opération, en tenant compte des pertes potentielles d'éléments nutritifs, repose largement sur les producteurs. En effet, plusieurs facteurs peuvent influencer ces pertes, mais ce projet s'intéresse spécifiquement aux facteurs météorologiques y étant rattachés.

Parallèlement en 2020, le gouvernement du Québec présentait son plan d'agriculture durable 2020-2030 dans lequel l'un des objectifs est d'optimiser la fertilisation azotée avec une cible de réduire celle-ci de 15 %. (Gouvernement du Québec, 2020) Dans cette perspective, l'amélioration des pratiques de gestion de la fertilisation, particulièrement en ce qui concerne le choix du moment d'épandage, constitue une voie prometteuse pour mieux répondre aux besoins des cultures, réduire les pertes d'azote et limiter le recours à la surfertilisation. Une telle optimisation contribuerait également à atténuer le potentiel d'émissions de gaz à effet de serre (GES) et d'ammoniac (NH_3) associées à la gestion des fertilisants.

Pour progresser dans cette direction, une compréhension approfondie et prédictive des effets météorologiques sur le comportement de l'azote dans les sols est essentielle. Ce projet s'appuie ainsi sur une revue de littérature visant à analyser l'influence des conditions climatiques lors des périodes clés d'application, notamment avant le semis ou après la récolte, moments reconnus pour leur importance dans la dynamique du cycle de l'azote.

À partir de cette analyse, l'objectif est de développer un outil d'aide à la décision pratique et accessible pour accompagner les producteurs et les conseillers dans leurs choix opérationnels, en intégrant des paramètres météorologiques pertinents afin de réduire les pertes et d'améliorer l'efficacité des fertilisants. Pour assurer la pertinence et l'adéquation de l'outil avec les réalités du terrain, des consultations ont été réalisées auprès de professionnels du secteur agricole.

2 Objectifs du projet

2.1 Objectif général

Définir et documenter l'état actuel des connaissances sur les effets des conditions météorologiques sur la volatilisation de l'azote suivant l'épandage de fumier et de lisier.

2.1.1 Objectifs spécifiques

1. Dresser un état des avancées scientifiques et technologiques sur l'intégration des informations météorologiques pour guider le choix des périodes propices à l'épandage;
2. Répertorier dans la communauté scientifique et pratique des outils et des données agrométéorologiques utilisées durant les périodes d'épandage;
3. Développer un outil d'aide à la décision pratique et accessible pour soutenir les producteurs dans la planification des activités d'épandage, en tenant compte des conditions météorologiques et des risques associés aux pertes d'azote.

3 Revue de littérature

3.1 Mise en contexte

Au courant des 70 dernières années, le Québec a connu une hausse de ses températures moyennes de l'ordre de 1,1°C, alors que mondialement la hausse moyenne des températures pour cette même période est de 0,8°C (Ouranos, 2016a). Entre 1948 et 2012, une augmentation moyenne de 10,5 % des précipitations annuelles a également eu lieu en territoire québécois (Ouranos, 2016b). Ces changements se manifestent notamment par des événements climatiques extrêmes, tels que les feux de forêt, les inondations ou les vagues de chaleur intenses. Les changements climatiques ont également des répercussions majeures en agriculture, notamment par l'augmentation du risque d'événements favorisant l'érosion des sols et la dégradation de la qualité de l'eau. Ils entraînent aussi une diminution du couvert de neige et une hausse des périodes de gel-dégel en hiver, modifient la survie des ravageurs en raison du réchauffement hivernal, accroissent la fréquence des

canicules qui affectent le confort et la reproductivité des animaux, et augmentent les épisodes de stress hydrique pour les cultures. Dans l'ensemble, ces phénomènes se répercutent directement sur les rendements des productions végétales et animales (CDAQ, 2021). Bref, les changements climatiques sont bien réels et il est impératif de s'attaquer à ses causes pour en limiter les impacts actuels et futurs.

Les émissions de gaz à effet de serre (GES) sont la principale cause des changements climatiques. En 2023 au Québec, 9,9 % des émissions de GES provenaient du secteur de l'agriculture (Figure 1). De celles-ci, 28,6 % étaient attribuable à la gestion des fumiers et 28,2 % de la gestion des sols agricoles (Figure 2).

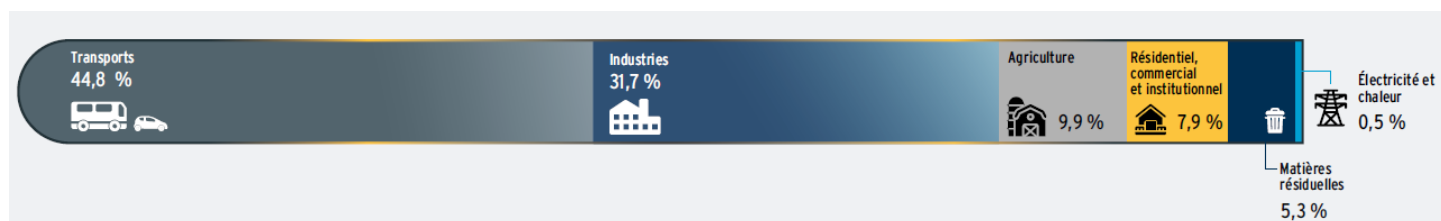


Figure 1. Répartition des émissions de GES au Québec, en 2023, par secteur d'activité. Tiré de MELCCFP (2025).

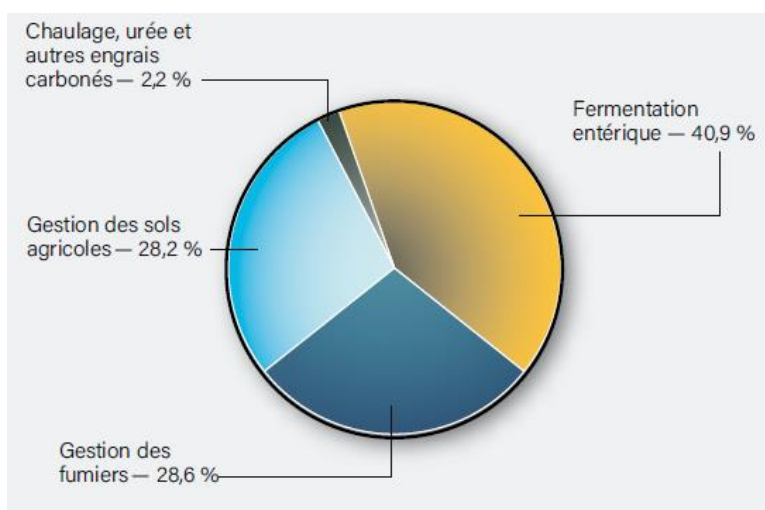


Figure 2. Répartition des émissions de GES en agriculture en 2023. Tiré de MELCCFP (2025).

Les émissions causées par l'épandage des fertilisants organiques et inorganiques sont comptabilisées dans la gestion des sols agricoles. Cette pratique cause inévitablement des pertes d'azote sous forme gazeuse, tel que le protoxyde d'azote (N_2O), un puissant gaz à effet de serre dont le potentiel de réchauffement climatique est de 265 fois supérieur à celui du CO_2 , et l'ammoniac (NH_3), une source indirecte de gaz à effet de serre (Figure 3). De plus, des pertes de phosphore (P) dans les eaux de surface et souterraines pouvant entraîner l'eutrophisation¹ des milieux humides.

¹ En écologie et en limnologie, l'**eutrophisation** est une réponse de l'écosystème à l'addition de substances. Ce problème environnemental indique l'apport en excès d'éléments nutritifs qui entraîne une forte croissance et une augmentation de certaines espèces végétales. Cela entraîne généralement une diminution considérable de la richesse en espèces ou de la biodiversité. Tiré de Eutrophisation : définition et explications (aquaportail.com). Pour les critères de qualité de l'eau et les valeurs de références, voir Établir des critères de qualité de l'eau et des valeurs de référence pour le phosphore, selon les éco-régions : opportunité, faisabilité et premier exercice exploratoire (gouv.qc.ca).

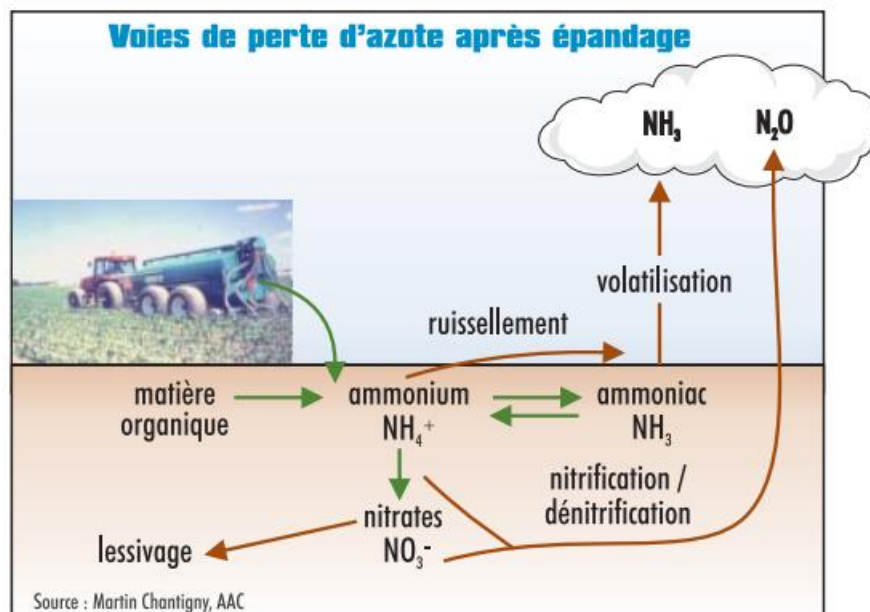


Figure 3. Voies des pertes d'azote lors de l'épandage (tiré de Rochette et al. (2013))

La présente revue de littérature répertorie les différentes pertes lors de l'épandage associées à un facteur météorologique. Cela a pour but d'identifier les moments où il sera préférable d'épandre de ceux qui le sont moins en regard du potentiel polluant qu'il peut représenter.

3.2 Problématique

Les plantes ont besoin de nutriments pour croître. En agriculture, des fertilisants sont apportés aux cultures végétales sous forme d'engrais organique (fumiers, lisiers, compost, matières résiduelles fertilisantes) ou inorganique (engrais minéraux). Sans cette fertilisation, les productions végétales ne seraient pas viables et les sols sur lesquels elles sont cultivées s'appauvriraient année après année. En parallèle, les productions animales génèrent inévitablement des fumiers ou des lisiers qui doivent être valorisés sur les terres agricoles. Il y a donc une complémentarité entre les deux types de production. Toutefois, ces engrais de ferme doivent être épandus et plusieurs facteurs influencent les pertes pouvant découler de cette pratique. Sans négliger les facteurs qui sont un peu plus connus comme le type d'équipement d'épandage ou le travail de sol pré et post épandage, cette revue s'attardera sur le bon moment pour épandre afin de limiter les pertes de nutriments dans l'environnement.

Plusieurs facteurs vont influencer les producteurs dans le choix du bon moment pour épandre. Tout d'abord, lorsqu'il est question d'engrais organique solide, souvent la période d'épandage favorisée sera à l'automne précédant l'implantation d'une culture. En effet, en raison de la teneur élevée en matière organique du fumier et de la forme sous laquelle l'azote qu'il contient se retrouve, l'épandage en automne favorisera une meilleure disponibilité des éléments nutritifs pour la plante au printemps qui suit. Ensuite, la décision du bon moment pour épandre peut aussi dépendre du stade de la culture. Par exemple, dans la culture de blé ou de maïs, une dose d'azote en post-levé est souvent nécessaire pour bien répondre aux besoins de la culture. Parfois, la décision d'épandre n'est pas tout à fait une question de choix. Par exemple, plusieurs producteurs sont dépendants d'un service d'épandage à forfait et prennent le service selon la disponibilité du forfaitaire. De plus, il arrive que le volume des infrastructures de stockage ne soit pas suffisant pour contenir d'avantage d'engrais de ferme et que les producteurs doivent absolument épandre une portion de ces engrais pour pouvoir accueillir ce que le troupeau produit. Finalement, il est important de parler du facteur météo qui vient influencer la décision des producteurs d'épandre ou non. Par exemple, si le sol est gorgé d'eau, le passage de la machinerie d'épandage viendra affecter la qualité du sol en raison du risque de compaction en profondeur ou encore de glissement/traçage en surface. Sinon, des prévisions de fortes pluies suivant un épandage pourraient causer le ruissellement des nutriments en surface. À l'inverse, l'absence de pluie après l'épandage peut entraîner des pertes d'azote par volatilisation, tandis qu'une pluie intense augmente plutôt les

risques de ruissellement et de lessivage. D'autres facteurs, tels que la chaleur (température et rayonnement) ainsi que la vitesse du vent, peuvent également accroître les pertes d'ammoniac lors de l'épandage.

De surcroît, les changements climatiques auxquels nous sommes actuellement confrontés ne viendront qu'accentuer les risques de pertes lors d'épandage. Par exemple, la hausse des précipitations sous forme liquide l'automne et pendant l'hiver risque d'accroître le phénomène d'érosion des sols et le lessivage des nutriments. Il sera impératif de bien choisir le moment pour les épandages afin de limiter les pertes de nutriments possibles (CDAQ, 2021).

3.3 Cadre réglementaire

Tout d'abord, il faut être conscient de la réglementation qui encadre l'épandage, car celle-ci peut influencer le moment jugé opportun pour réaliser un épandage.

Le Règlement sur les exploitations agricoles (REA) impose des restrictions temporelles, avec des applications autorisées uniquement du 1er avril au 1er octobre. Toutefois, un agronome responsable du plan agroenvironnemental de fertilisation (PAEF) d'un producteur peut autoriser un épandage postérieur au 1er octobre si jugé approprié, à condition que le sol ne soit ni gelé ni enneigé et que le volume épandu ne dépasse pas 35 % du volume annuel produit (Règlement sur les exploitations agricoles, Q-2, r. 26 et MDDELCC, 2017). Cette réglementation pose des limites basées sur des conditions climatiques, mais manque de clarté sur ce qui constitue précisément un sol gelé ou enneigé, laissant ainsi aux producteurs et à leur agronome la responsabilité de déterminer l'adéquation du sol le jour de l'épandage. De plus, aucune directive n'est fournie concernant l'épandage de fertilisants durant des événements climatiques extrêmes, tels que des canicules ou des précipitations abondantes.

Il faut également savoir que tout amas de fumier solide doit être enlevé dans les 12 mois suivant le début de sa formation (Règlement sur les exploitations agricoles, Q-2, r. 26).

3.4 Recommandations des agronomes

L'agronome qui voudrait autoriser un épandage en dehors de la plage autorisée par l'art.31 du REA doit informer son client de la nécessité de faire caractériser ses déjections animales, car il doit faire ajouter à son PEAF l'azote ammoniacal et le rapport C/N de son engrais de ferme (OAQ, 2018).

Dans sa recommandation, l'agronome doit tenir compte de la synchronisation de la disponibilité de l'azote avec les besoins de la culture de manière à éviter les pertes par lessivage ou ruissellement. Un engrais organique avec un rapport $N-NH_4^+/N \geq 50\%$ ou avec un rapport $C/N < 15$ procurera une libération rapide des nitrates. Ainsi, il est à éviter de recommander son épandage sur un sol à nu (OAQ, 2018).

En cas de planification d'épandage sur un sol à nu, il est recommandé d'enfouir l'engrais organique dans un délai de 24 heures, surtout s'il s'agit d'une matière avec un $C/N < 25$ et rapport $N-NH_4^+/N \geq 50\%$ (OAQ, 2018).

Le choix de la parcelle réceptrice est aussi à prendre en compte. À l'inverse d'un sol en culture ou ayant des résidus de culture, un sol à nu ou un sol sableux par exemple, sera plus susceptible aux pertes par lessivage ou ruissellement. Il serait recommandable de diminuer l'apport dans une telle situation pour mitiger le risque. Il sera également important de prendre en compte la présence de pente et de plans d'eau, puits ou fossés à proximité (OAQ, 2018).

Pour les épandages tardifs en automne, comme le froid ralentit la transformation de l'azote, il s'agit d'un moment où il est recommandable de faire un épandage si la portance et la saturation du sol en eau sont favorables. Toutefois, comme l'immobilisation est réduite à des températures sous 2°C, les engrais organiques avec un $C/N > 15$ devraient être épandus plus tôt pour permettre une immobilisation de l'azote (OAQ, 2018).

3.5 Facteurs autres que météorologiques à prendre en compte pour le moment d'épandage

3.5.1 Disponibilité de la main-d'œuvre et des équipements

Les producteurs peuvent réaliser les épandages eux-mêmes ou à forfait. Dans le premier cas, ils doivent concilier plusieurs activités telles que les récoltes et les semences. Similairement, l'épandage à forfait peut limiter la flexibilité du moment de l'épandage en raison de l'horaire chargé des forfaitaires.

3.5.2 Restrictions imposées par les pratiques d'entreposage

Selon la réglementation, un amas formé depuis 12 mois doit être retiré. De plus, il peut être nécessaire de vider une fosse qui n'aurait pas une capacité suffisante pour le troupeau, soit tard à l'automne ou tôt au printemps (OAQ, 2018).

3.5.3 Synchronisation avec les besoins de la plante

Un rapport $N-NH_4^+/N \geq 50\%$ ou un rapport $C/N < 15$ indiquera une libération rapide des nitrates. Cette information permet de déterminer un bon synchronisme avec les besoins des plantes et ainsi éviter les pertes environnementales. Généralement, les engrais organiques avec une libération plus lente des nutriments seront épandus en automne ou à la fin de l'été, alors que ceux avec une libération plus rapide seront à valoriser au printemps ou en saison de culture. Les doses d'engrais épandues doivent correspondre aux besoins de la culture. Dans le cas de parcelles saturées en phosphore, l'apport maximal est de 45 kg de P_2O_5 total/ha/an ou 135 kg de P_2O_5 total/ha sur trois années.

3.5.4 Propriétés physiques des sols

Si la parcelle a une texture de sol grossière (moins de 18 % d'argile), elle sera également plus susceptible à l'érosion ou au lessivage et il sera important de limiter l'apport en nutriments aux besoins de la culture ou moins. De plus, il pourrait être recommandé d'incorporer l'engrais au sol.

La portance du sol, en lien avec son degré de saturation en eau ou la hauteur de la nappe phréatique, est un facteur important à prendre en considération pour éviter la compaction du sol ou les risques d'érosion ou de lessivage pouvant entraîner des pertes et l'émission de GES.

3.5.5 Présence de cultures ou résidus de culture

Le choix de la parcelle visée par un épandage va aussi influencer le moment de l'épandage. Il faut savoir que les parcelles sans culture ou résidus vont être plus favorable à l'érosion, et d'autant plus s'il y a une pente (Côté et al., 2002). Les pertes d'azote par volatilisation sont également plus grandes sur les sols à nu ou sans résidus de cultures.

Les études de Clark et al. (2009) et de Wertz et al. (2013) ont démontré que la minéralisation et la nitrification de l'azote continuaient de se réaliser jusqu'à -6°C dans les sols lourds et jusqu'à -2°C dans les sols légers. Toutefois, les nitrates alors formés sont sous une forme à risque de lessivage ou de dénitrification en période de gel-dégel (Gamache, 2014). L'apport de résidus de culture favorise pour sa part une immobilisation de l'azote pouvant ainsi limiter les pertes subséquentes (Clark et al., 2009 et Wertz et al., 2013).

Pour les applications d'engrais tôt à l'automne (ou fin de l'été) il est intéressant d'avoir une culture (engrais vert, céréales d'automne) qui captera les nutriments au moins temporairement afin de limiter les pertes éventuelles provoquées par cet épandage.

3.5.6 Caractéristiques de la matière organique épandue

Il a été prouvé que différentes caractéristiques de la matière organique épandue telles que le pH ou sa teneur en matière sèche sont des facteurs qui vont influencer la volatilisation de l'azote. Dans son outil d'estimation de la volatilisation, ALFAM2 tient d'ailleurs compte de ces paramètres (Hafner et al., 2025).

Sommer et Olesen (1991) ont étudié le lien entre le contenu en matière sèche du lisier épandu et la volatilisation de l'azote. Ils ont pu établir que dans les six premières heures suivant l'application, les pertes d'azote par volatilisation suivent une relation linéaire avec le contenu en matière sèche du lisier. Pour des valeurs de MS entre 0,9 et 22 %, les pertes sont de 1,6 à 58,6 % du NH_4^+ appliqué. Rochette et al. (2013) affirment quant à lui que la volatilisation de l'azote augmente proportionnellement à la MS pour des MS entre 2 et 12 %. Pour des valeurs au-delà de 12 %, il n'y aurait plus d'effet supplémentaire sur la volatilisation.

3.6 Mécanismes causant les pertes d'azote et impact des conditions météorologiques

3.6.1 Le cycle de l'azote

Parmi les éléments nutritifs primaires figure l'azote, qui est l'une des principales composantes de la chlorophylle et des acides aminés protéiniques qui empêchent les plantes de se flétrir et de mourir (Beef Cattle Research Concil, 2023). L'azote est essentiel pour que les plantes obtiennent des rendements optimaux et elle a un impact direct sur leur taux de protéines. C'est pourquoi elle est l'un des éléments dont les plantes ont le plus besoin et les engrais azotés sont les plus consommés, en particulier l'urée (Siman et al., 2021). Les plantes absorbent les nutriments sous forme inorganique, mais l'azote du fumier est principalement de l'azote organique (à libération lente) avec un peu de nitrate-N inorganique (à libération rapide). La matière organique doit donc se décomposer pour permettre la minéralisation des nutriments en formes inorganiques (nitrate; NO_3^- , et ammonium; NH_4^+) qui peuvent alors être assimilés par les plantes. L'azote disponible pour les plantes dépend de la source, du moment, des conditions du sol et des températures.

Pour répondre à la demande des cultures, des engrais organiques ou minéraux sont appliqués au champ par les producteurs. Cependant, l'épandage des différents types d'engrais est une opération qui nécessite une bonne gestion pour éviter le risque de pollution de l'environnement. En effet, les éléments nutritifs appliqués en excès au sol peuvent être relâchés dans l'environnement (Institut des technologies agroalimentaires, 2007). Dans le cas de l'azote, il existe trois mécanismes principaux de perte (Figure 4) : la lixiviation (lessivage), la dénitrification (souvent dans les sols saturés en eau, pouvant causer des émissions de N_2O) et la volatilisation (perte dans l'air sous forme d'ammoniac) (ESN, 2024).

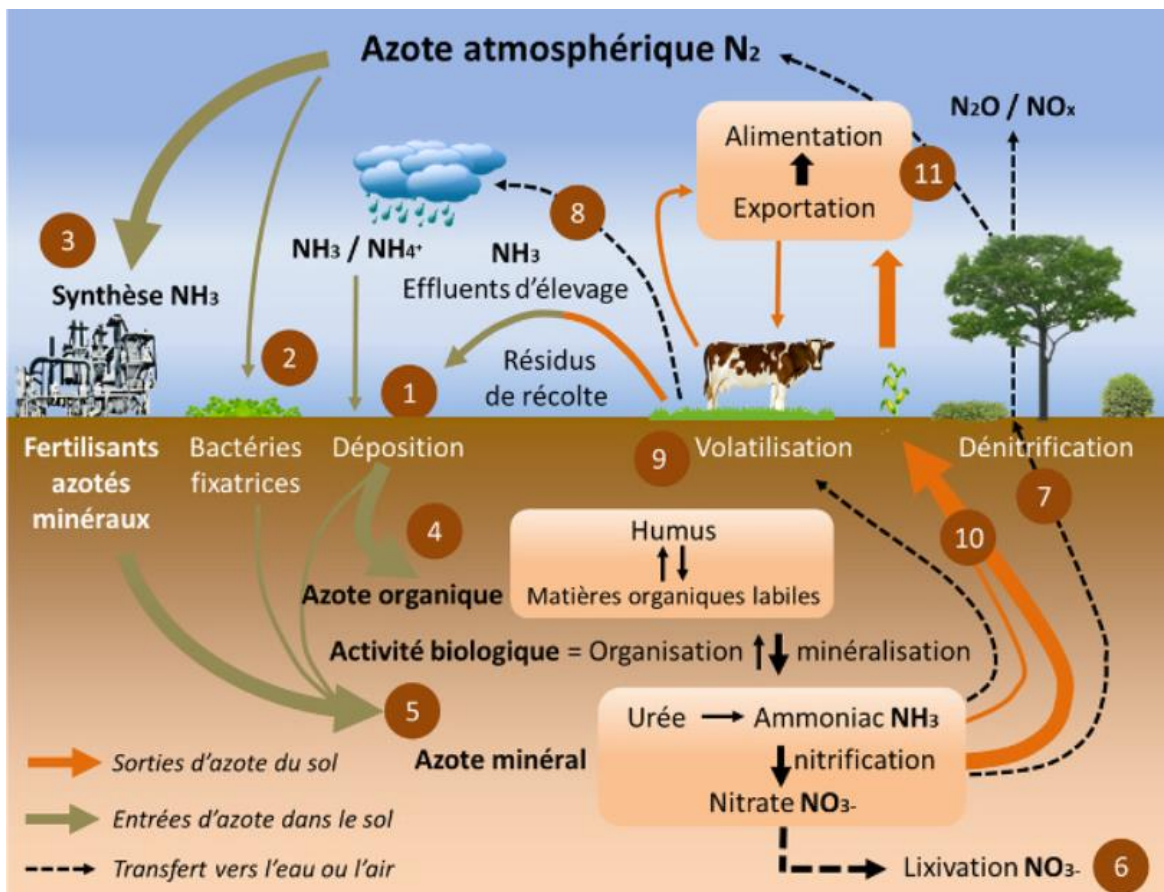


Figure 4. Cycle de l'azote (tiré de Brouquisse R. et Puppo A. (2019))

3.6.2 La volatilisation de l'azote sous forme d'ammoniac (NH_3)

3.6.2.1 Processus de volatilisation

La perte d'azote dans l'air lors de l'épandage est causée par la volatilisation de l'ammoniac (NH_3). Ce phénomène se produit lorsqu'il y a une accumulation d'azote ammoniacal [NH_3 (gaz) + NH_4^+ (soluté)] près de la surface du sol. Les mécanismes de

consommation de l'azote ammoniacal (nitrification, absorption par les plantes, adsorption sur les particules du sol, immobilisation dans la matière organique) mettent plusieurs jours à éliminer l'accumulation ou l'excès d'azote ammoniacal provenant d'apports soudains de fumier, de lisier et d'engrais ammoniacaux (urée) dans les sols agricoles. C'est généralement au cours des premières heures ou premiers jours que le risque de volatilisation augmente. (Rochette, 2008)

Les équilibres physico-chimiques entre l'azote ammoniacal dans le sol et la volatilisation de l'ammoniac dans l'atmosphère sont illustrés dans la

Figure 5. Ces réactions sont toutes réversibles, ce qui signifie que tout changement dans la concentration d'une substance affecte automatiquement celle d'une ou de plusieurs autres. Lors de l'application de lisier sur le sol, la quantité des deux formes d'azote ammoniacal (NH_3 et NH_4^+) présentes dans l'eau du sol augmente immédiatement. Un délai de 1 à 3 jours est observé entre l'ajout d'urée et l'augmentation de l'azote ammoniacal dans le sol, en raison du temps nécessaire pour l'hydrolyse de l'urée. La concentration de NH_3 en solution dans l'eau du sol dépend de plusieurs facteurs. Elle augmente initialement avec la concentration de NH_4^+ ; une capacité d'échange cationique (CEC) élevée diminue cette concentration en fixant davantage de NH_4^+ sur les sites d'échange. La proportion d'azote ammoniacal restant en solution sous forme de NH_3 augmente ensuite en fonction du pH et de la température. L'accroissement de la concentration de NH_3 en solution après l'application d'amendements entraîne une augmentation de la quantité de NH_3 gazeux dans l'air du sol, en raison de l'équilibre entre les phases liquide et gazeuse du NH_3 . Enfin, une partie plus ou moins importante de ce NH_3 gazeux s'échappe dans l'atmosphère, selon l'épaisseur et les conditions (teneur en eau, compaction, texture, etc.) de la couche de sol à traverser. (Rochette, 2008)

L'ammoniac qui se retrouve sous forme gazeuse vient polluer l'environnement (polluant atmosphérique, participe après dépôt à l'eutrophisation des eaux superficielles, à l'acidification des sols et porte atteinte à la biodiversité des écosystèmes naturels) (Morvan, T. et Genermont, S., 2004) et peut engendrer des conséquences sur la santé humaine et animale (asthme, bronchites chroniques, diminution des performances zootechniques) (Portejoie et al., 2020). Bien qu'elle ne soit pas considérée comme un gaz à effet de serre, la volatilisation ammoniacale constitue un enjeu environnemental majeur. Elle entraîne des pertes importantes d'azote et peut contribuer indirectement à la formation de protoxyde d'azote (N_2O). L'ammoniac volatilisé est redéposé sur les sols environnants, où il peut être transformé en nitrates par nitrification, puis en N_2O par dénitrification. La production de ce gaz à effet de serre dépend fortement des conditions du sol. Des conditions anaérobies, provoquées par le compactage du sol ou par son engorgement en eau, favorisent particulièrement la dénitrification et la production de N_2O .

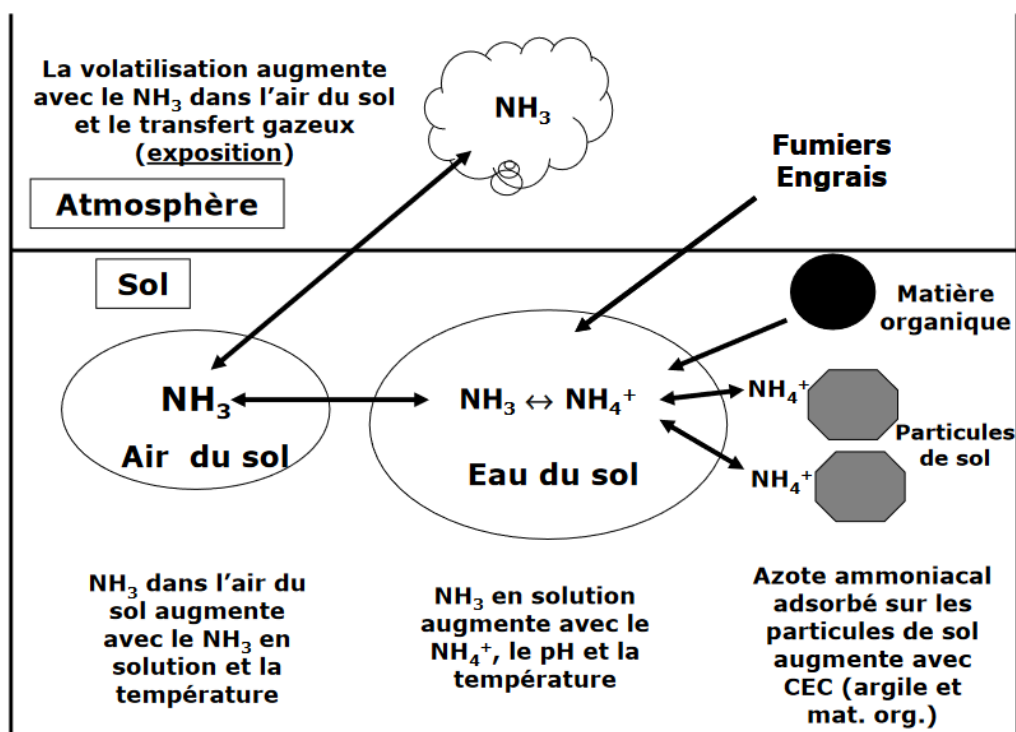


Figure 5. La volatilisation de l'ammoniac et les équilibres entre les différentes formes d'azote ammoniacal dans le système sol-atmosphère. Tiré de Rochette (2008).

3.6.2.2 Méthodes de mesure et d'estimation

3.6.2.2.1 La méthode des enceintes fermées

Les méthodes de mesure des émissions se divisent en deux grandes catégories : les méthodes en enceinte permettent une mesure localisée, comparativement aux méthodes micrométéorologiques qui permettent d'étendre l'analyse à des échelles plus larges. Les méthodes en enceinte utilisent des tunnels de vents, chambres statiques ou dynamiques pour mesurer les émissions sur de petites surfaces et permettent de comparer différents traitements, mais elles peuvent modifier l'environnement et ainsi influencer la mesure (Scotto di Perta et al., 2019). Elles présentent aussi une variabilité élevée entre parcelles, mais sont appropriées pour comparer les émissions de sols fertilisés avec différents types de lisier ou différentes méthodes d'épandage.

3.6.2.2.2 La covariance des tourbillons

La covariance des tourbillons (EC) est une méthode micrométéorologique largement utilisée pour mesurer directement les échanges de gaz, d'énergie et d'impulsion entre les écosystèmes et l'atmosphère. La EC est considérée comme la méthode de référence en raison de sa large application et de ses hypothèses théoriques limitées. Cette technique calcule les flux à partir de la covariance entre les fluctuations de la vitesse verticale du vent et de la concentration du gaz ou de l'énergie cible. Cela permet des mesures directes et continues des flux de carbone, de vapeur d'eau et de chaleur à travers les écosystèmes, avec des empreintes spatiales de 100 à 2 000 m et une résolution temporelle allant de quelques heures à plusieurs années. Bien que les exigences en matière de matériel et de traitement des données soient élevées, les progrès réalisés dans le domaine des capteurs et de l'informatique ont rendu l'EC de plus en plus accessible, renforçant ainsi son rôle d'outil standard pour étudier les interactions entre la biosphère et l'atmosphère (Shunlin Liang, et Jindi Wang, 2020).

3.6.2.2.3 La méthode du gradient aérodynamique (AGM)

C'est une approche micrométéorologique qui estime les flux gazeux à partir du gradient de concentration vertical et de la diffusivité turbulente. Comparée à la méthode de covariance des tourbillons (EC), l'AGM ne nécessite pas d'analyseurs à réponse rapide et peut utiliser des mesures à plus basse fréquence à différentes hauteurs. Les estimations de flux issues de l'AGM représentent une moyenne sur la zone d'empreinte au vent, qui dépend des conditions météorologiques, des conditions de surface et de la hauteur du capteur. La méthode suppose des conditions homogènes et stationnaires sans

divergence de flux. L'AGM constitue une option couramment retenue lorsque des contraintes économiques ou des exigences accrues en matière de limites de détection sont présentes. Si cette méthode nécessite en principe des mesures simultanées à deux hauteurs, certaines études ont néanmoins utilisé un unique analyseur pour effectuer des mesures alternées à deux niveaux, produisant des données de concentration non simultanées et discontinues. Il en ressort que cette configuration n'engendre que des erreurs limitées dans les estimations de flux, la différence relative moyenne demeurant inférieure à 7 % comparativement à une AGM basée sur des mesures continues et simultanées (Kamp et al., 2020).

3.6.2.2.4 Modèle stochastique lagrangien inversé (bLS)

Le bLS est une méthode micro météorologique qui utilise un modèle de dispersion inverse en déduisant une source d'information à partir d'une concentration connue. Avec ce type de méthode, si la précision du modèle de dispersion imite bien le transport atmosphérique, il n'y aurait donc plus de restrictions sur la grosseur ou la forme de la source d'émission (Flesch et al., 2004).

Par ailleurs, comparativement à d'autres modèles, celui-ci offre une flexibilité au niveau de la localisation de la mesure de concentration et elle peut être prise à une seule hauteur. L'emplacement du capteur sous le vent est crucial pour la précision du modèle. Un désavantage de cette méthode est que sa précision est moindre en cas de stabilité atmosphérique ou de grande turbulence (Yang et al., 2016 et Flesch et al., 2004).

Selon l'étude de Yang et al. (2016), La hauteur du capteur influence davantage la précision du modèle que la distance avec la source d'émission. Ils suggèrent que le capteur soit placé à un minimum de 0,58m au-dessus de la canopée. Dans leurs essais, la hauteur optimale a été de 1,35m et ils ont pu obtenir des résultats précis à des distances entre 15 et 60 m de la source d'émission, ce qui permet une bonne latitude en termes de distance.

3.6.2.2.5 Modèle FIDES (Flux Interpretation by Dispersion and Exchange over the Short-range)

Le modèle FIDES est un outil de dispersion et d'échange destiné à l'étude des polluants gazeux et particulaires à proximité des sources (< 5 km). Il est particulièrement utilisé en agriculture pour estimer les émissions d'ammoniac (NH_3) provenant de champs et d'exploitations d'élevage. FIDES constitue le module de transfert atmosphérique du modèle NitroScape et peut également être utilisé en mode inverse afin d'estimer les sources à partir des concentrations mesurées (Loubet, B., 2014)

Le modèle s'appuie sur une solution analytique de l'équation d'advection-diffusion, en supposant que les profils de vent et de diffusivité suivent des lois de puissance selon la hauteur. Il peut être appliqué en configurations 2D ou 3D (panache gaussien horizontal) et intègre un module d'échange de gaz traces, incluant un point de compensation pour le sol ou la végétation, ainsi qu'une résistance cuticulaire pour le dépôt sur les feuilles. FIDES permet ainsi de calculer les flux d'ammoniac à partir des concentrations mesurées, des conditions météorologiques et des caractéristiques des sources, tout en évaluant l'advection locale et en quantifiant les pertes d'azote dans les systèmes agricoles (Loubet, B., 2014).

3.6.2.2.6 ZINST (modèle instationnaire de Zurich)

ZINST est la méthode du flux horizontal intégré. Elle est basée sur des connaissances empiriques du modèle de simulation Lagrangien qui, pour une grandeur de parcelle donnée, une rugosité de surface donnée et à émission constante de gaz, détermine une hauteur où le flux horizontal de gaz est indépendant de la stabilité atmosphérique. La hauteur de ce ratio de flux horizontal constant est déterminée par expérimentation et par la suite, une seule mesure permet de calculer des émissions gazeuses. Cette méthode a l'avantage d'être simple vu le type de mesure qu'elle nécessite et l'absence de nécessité d'appareil à haute fréquence. (Laubach et al. 2012 et Wilson et al., 1982)

3.6.2.3 Impact des facteurs météorologiques sur la volatilisation de l'azote des engrais organiques

La volatilisation de l'azote sous forme d'ammoniac (NH_3) lors de l'épandage au champ est influencée par différents paramètres tels que la technique d'application, le taux d'application, le pH du fumier, la matière sèche du fumier, le sol, le type de culture, les conditions climatiques et le moment de l'application. Cependant, en raison de l'interaction entre ces paramètres, il est difficile de déterminer l'effet individuel de ces paramètres sur l'émission d'ammoniac. Huijsmans et al. (2001) ont étudié la quantification des différences relatives dans la volatilisation de l'ammoniac entre trois techniques d'application différentes (épandage en surface, application en bande étroite (BE) et incorporation en surface), en évaluant

d'autres facteurs influençant l'ampleur de la volatilisation. L'évaluation de l'effet des facteurs externes sur la volatilisation de l'ammoniac a été effectuée pour chaque type de technique employée, ce qui a permis de constater que la teneur en azote ammoniacal (NH_4^+) du lisier ou fumier, le taux d'application, la hauteur du pâturage et les conditions climatiques (vitesse du vent, rayonnement, température de l'air et humidité relative) affectent la volatilisation, mais que leurs effets diffèrent d'une technique à l'autre (Huijsmans et al., 2001).

Cette étude (Huijsmans et al., 2001) a montré que 50 % de la variation de la volatilisation du NH_3 était expliquée par la technique et que la variation du taux de volatilisation expliquée par des facteurs externes était de 46, 64 et 59 % pour l'épandage en surface, l'application en bande et l'injection en surface, respectivement. Dans l'ensemble, la volatilisation du NH_3 du fumier appliqué en surface variait de 27 à 98 % du NH_4^+ appliqué. Avec l'épandage en bande étroite, la volatilisation était comprise entre 8 et 50 %, et avec l'injection en surface, entre 1 et 25 % de l'azote ammoniacal appliqué. La vitesse du vent a influencé le taux de volatilisation pour toutes les techniques d'application. Une augmentation de la vitesse du vent de 2 m/s a augmenté le taux de volatilisation d'un facteur de 1,65 pour l'application en surface, de 1,55 pour l'application en bande et de 1,27 pour l'injection superficielle. Dans son étude de 2003, Huijsmans et al. affirmaient alors qu'une augmentation de 2 à 5 m/s du vent augmentait de 65 % la volatilisation pour l'épandage de surface et de 74 % pour l'incorporation en surface.

Le rayonnement, la température de l'air et l'humidité relative ont également influencé le taux de volatilisation, mais leur impact dépend de la technique utilisée. Une augmentation du rayonnement a accentué la volatilisation lors de l'application et de l'injection à faible profondeur. En effet, lors de la dispersion en surface, une augmentation du rayonnement de 100 J/cm²/h a provoqué une hausse du taux de volatilisation comparable à celle induite par une augmentation de la vitesse du vent de 2,25 m/s. Pour l'application en bande étroite et l'injection superficielle, la volatilisation augmente avec la température de l'air, mais dans le cas de l'application en bande étroite, elle diminue avec l'augmentation de l'humidité relative. Pour l'application en bande étroite et l'injection superficielle, la volatilisation augmente avec la température de l'air, mais dans le cas de l'application en bande étroite, elle diminue avec l'augmentation de l'humidité relative. Lors de la dispersion en surface, une augmentation du rayonnement de 100 J/cm²/h a provoqué une hausse du taux de volatilisation comparable à celle induite par une augmentation de la vitesse du vent de 2,25 m/s. Pour l'application en bande, l'effet d'une augmentation de la vitesse du vent de 2 m/s a pu être compensé par une diminution de la température de l'air de 9 °C ou une hausse de 25 % de l'humidité relative. En ce qui concerne l'injection superficielle, la réduction de la température nécessaire serait de 6 °C. L'augmentation de la hauteur de l'herbe a réduit la volatilisation du NH_3 lors de l'application du fumier en bandes étroites. Avec cette technique, une réduction de la hauteur de l'herbe de 8 à 4 cm peut être compensée par une diminution de la vitesse du vent de 2,5 m/s ou une augmentation d'environ 30 % de l'humidité relative (Huijsmans et al., 2001).

Brassard et al. (2024) se sont également intéressés aux pertes relatives à l'épandage en fonction de différentes techniques d'application. Ces travaux ont permis de constater que des températures au-delà de 25°C affectaient grandement les pertes d'azote ammoniacal par volatilisation. Similairement, Huijsmans et al. (2003) observaient qu'une variation de la température de 10 à 20°C augmentait la volatilisation de 54 %, 73 % et 84 % pour l'application en surface, l'incorporation en surface et l'incorporation en profondeur. Dans une étude moins récente, Svensson (1994) a déterminé que la volatilisation de l'azote pouvait tripler de 14 à 24 °C. Il notait toutefois que la température affectait aussi d'autres paramètres tels que l'humidité de l'air et du sol et qu'une synergie entre ses facteurs faisait varier les pertes d'azote ammoniacal.

D'autre part, Pedersen et al. (2021) ont étudié l'effet de la température de l'air sur les émissions de NH_3 lors de l'épandage en bandes de lisier de vache et porc (pendillards et injecteurs), ainsi que l'influence de la matière sèche sur l'interaction entre le type de sol et la technique d'application sur les émissions cumulées de NH_3 . Cette étude a montré que la variation de la température entre 5 et 14 °C a un effet significatif sur les émissions cumulées de NH_3 , mais qu'aucune augmentation majeure des émissions n'est évidente lorsque la température augmente de 15 à 20 °C. Cette différence de résultats avec les études de Brassard et al. (2024) et Huijsmans et al. (2003) pourrait s'expliquer par la formation d'une croûte sèche en surface. Il a également été constaté que l'application avec une rampe de pendillard réduit les émissions de NH_3 de 18,5 %, 36,4 % et 27,7 % par rapport aux injecteurs pour le sable grossier, le sable limoneux et le limon sableux respectivement. De plus, une interaction statistique significative a été observée entre le type de sol et la technique d'application, ce qui signifie

que les différences dans les effets des types de sol varient en fonction de la technique d'application utilisée. Les émissions de NH_3 provenant du limon sableux sont nettement supérieures à celles du sable grossier et du sable limoneux, quelle que soit la technique d'application employée. L'effet de la matière sèche (MS) sur les émissions de NH_3 s'est également révélé significatif, avec des émissions en moyenne 50 % plus faibles pour les lisiers ayant une $\text{MS} \leq 4$ g/kg par rapport à ceux ayant une $\text{MS} > 4$ g/kg (Pedersen et al., 2021).

Les travaux de Sommer et al. (1991) ont permis d'établir certaines relations entre les facteurs météorologiques et la volatilisation de l'azote. Entre autres, ils démontrent une forte corrélation entre le taux de volatilisation et la température dans les 6 premières heures suivant l'application, mais cette corrélation s'estompe avec le temps. Ces résultats démontrent l'importance de la température au moment précis de l'épandage. Ils ont remarqué aussi que la volatilisation est proportionnelle au contenu en NH_4^+ de l'engrais organique utilisé, c'est pourquoi les pertes sont généralement exprimées en proportion de NH_4^+ contenu dans l'engrais de départ. Pour le facteur vent, la volatilisation augmente avec l'augmentation de la vitesse du vent allant de 0 à 2,5 m/s. Toutefois, pour des vitesses de 2,5 à 4 m/s, l'effet du vent ne semblait plus faire augmenter la volatilisation. Dans une autre étude menée par Thompson et al. (1990), l'effet du vent de 0,5 à 3 m/s a contribué à augmenter les pertes d'un facteur de 0,29 sur une période de 5 jours, la température ayant pu avoir un effet synergique sur les pertes associées au vent.

Sommer et Olesen (2000) ont établi une corrélation significative entre la vitesse du vent et la volatilisation ($r = 0,59$), ainsi qu'entre le contenu relatif en eau de surface et la volatilisation ($r = 0,55$). Après le suivi du flux de volatilisation de l'ammoniac pendant 6 jours, il y a avec encore une forte corrélation avec le contenu relatif en eau de surface ($r = 0,75$). Il y avait alors aussi des corrélations significatives avec la radiation ($r = 0,32$), la pluie ($r = -0,32$), l'accumulation de pluie ($r = -0,37$) et le pH de surface ($r = 0,27$). Les valeurs négatives indiquent une diminution de la volatilisation en raison de l'infiltration du NH_4^+ appliqué et du séchage du sol. De plus, le modèle qu'ils ont développé indique une possibilité de diminuer les pertes d'azote ammoniacal de 50 % avec des applications tôt le matin (6h00) ou en soirée (18h00). De plus, leur expérience a pu établir qu'une application sur sol à nu par rapport à un sol en culture de céréales pouvait engendrer 75 % plus de volatilisation.

Lors de l'application d'un engrais organique, il se produit une augmentation du pH en surface qui vient affecter la volatilisation de l'azote et qui dure environ 24 heures. Par la suite, le pH à la surface du sol redescend de même que les pertes d'azote ammoniacal. Il s'en suit alors une synergie avec les autres facteurs météorologiques abordés (Sommer et al., 1991).

Gordon et al. (2000) ont pu mettre en lumière que procéder à un épandage en soirée plutôt que le matin ou durant la journée pouvait permettre de réduire les pertes de NH_3 de 28 à 56 %. Moal et al. (1995) et Sommer et Olesen (2000) en étaient également venus à cette conclusion avec des proportions de réduction de 37,5 % à 45 % et de 50 %, respectivement. En fait, il s'avère que l'application en soirée coïncide avec des mesures de température, de rayonnement et de déficit de pression de vapeur plus faible. Il est difficile de confirmer l'impact exact de chacun des facteurs météorologiques individuellement, car il existe une synergie entre eux. Il ressort toutefois que la corrélation entre la radiation et la volatilisation semble la plus forte ($r^2 = 0,56$). Moal et al. (1995) présentaient quant à eux des corrélations décroissantes entre la température, le % de MS de l'engrais et son contenu en NH_4^+ , mais les mesures de vent et de radiation n'étant pas suivies dans cette étude. Gordon et al. (2000) ont aussi démontré que les applications plus tardives (à l'automne) sont moins à risque de volatilisation, car les températures et la radiation sont généralement plus basses. Ce même constat a été fait par Girard et al. (2017) alors que les pertes d'azote ammoniacal étaient plus grandes lors d'épandage au printemps par rapport aux épandages d'automne. À noter que les conditions météorologiques de soirée sont des facteurs qui vont créer une persistance de l'odeur suivant l'épandage (Mkhabela et al., 2008). Gordon et al. (2000) considèrent que 65,7 % des pertes par volatilisation se produisent dans les 10 heures suivant l'épandage.

Pour les engrais organiques, l'étude de Sharpe et al. (2004) a rapporté une nette diminution de la volatilisation de l'azote suivant un événement de pluie de 17 mm qui s'est produit environ 24 heures après l'application. Dans cette étude, il y avait également une corrélation entre les pertes par volatilisation, la température et le vent. Les pertes ont varié entre 3 et 24 % avec le maximum atteint avec les températures et le vent les plus élevés.

3.6.2.4 Le projet européen ALFAM2 sur la volatilisation de l'azote

3.6.2.4.1 Aperçu général

Face à l'hétérogénéité des résultats observés et à la complexité des interactions entre les facteurs météorologiques et les processus de volatilisation de l'ammoniac, un projet collaboratif intitulé ALFAM (Ammonia Volatilization from Field-Applied Animal Slurry) a été mis en place (Søgaard et al., 2002). Ce projet a permis de constituer une base de données destinée à rassembler et à analyser de manière intégrée les résultats d'études existantes. Une première version a été publiée en 2002, suivie d'une version actualisée en 2018 (Hafner et al., 2018). À partir de cette base de données, un modèle semi-empirique dynamique a été conçu pour quantifier et prédire les émissions d'ammoniac (NH_3) après l'épandage de fumier liquide ou semi-solide sur les sols agricoles (Hafner et al., 2019).

3.6.2.4.2 La base de données ALFAM2

La version étendue de la base de données compile des résultats de projets réalisés sur 1 895 parcelles issues de 22 instituts dans 12 pays, incluant des informations sur les sols, fumiers, cultures, méthodes d'application, conditions météorologiques et émissions d'ammoniac.

Les données portent majoritairement sur les lisiers de bovins laitiers (1 083 parcelles) et de porcs (606 parcelles), avec une matière sèche généralement < 10 % pour les bovins et < 5 % pour les porcs. L'épandage en surface est le plus représenté, suivi des bandes à pendillards et d'autres méthodes moins documentées. Les émissions sont mesurées surtout par méthodes micro-météorologiques, avec des conditions variables de température (0–29 °C) et de vent (3,5–11 km h⁻¹), et durées d'émission allant de 1 h à 59 jours, la moitié des pertes se produisant dans les 12 premières heures après l'épandage.

Une analyse statistique basée sur des modèles linéaires à effets mixtes a été réalisée afin d'interpréter l'ensemble des résultats issus de la base de données. La méthode d'épandage apparaît comme le facteur le plus déterminant et le plus fiable pour la réduction de la volatilisation de l'ammoniac, suivie par la teneur en matière sèche, le TAN, le pH, la température, la vitesse du vent et la hauteur du couvert végétal. Toutefois, une variabilité importante subsiste entre les sites et les conditions expérimentales, ce qui rend la prévision précise des émissions difficile.

3.6.2.4.3 Modèle ALFAM2

Le modèle ALFAM2 est un modèle dynamique semi-empirique estimant les émissions de NH_3 selon les caractéristiques du lisier, la méthode d'application et les facteurs environnementaux. Il divise l'azote ammoniacal total appliquée (TAN) en fraction rapide (émissions immédiates) et fraction lente (émissions retardées, influencées par infiltration, adsorption, croûte, incorporation) (figure 6).

Les cinq paramètres principaux contrôlent la proportion initiale, la vitesse d'émission et le transfert entre fractions, tandis que des paramètres secondaires relient ces effets aux variables prédictives : dose, MS, TAN, pH, température, vent, précipitations, méthode d'application, type de sol et hauteur de culture. Les paramètres ont été calibrés à partir d'un sous-ensemble de données de l'ALFAM2 pour représenter des conditions moyennes de référence.

Des simulations réalisées avec le modèle montrent que la fraction rapide varie de 13 % (injection en fente ouverte) à 71 % (pendillards avec lisier concentré). Une augmentation de la température et de la vitesse du vent entraîne une hausse des émissions d'environ 12 % par unité d'augmentation. Par rapport à l'aspersion basse, l'utilisation de rampes à pendillards permet une réduction des émissions de 33 %, l'injection de 63 %, tandis que l'incorporation peut conduire à une diminution allant jusqu'à 80 %. L'acidification du lisier, avec une baisse du pH de 7,5 à 6,0, réduit les émissions de 60 à 70 %, alors qu'une pluie modérée (5 mm h⁻¹) survenant dans les trois premiers jours suivant l'épandage peut les abaisser jusqu'à 3 %. Les profils temporels simulés reproduisent une volatilisation élevée immédiatement après l'épandage, suivie d'une décroissance progressive, avec la méthode d'application comme facteur prédominant. Le modèle est disponible sous forme de package R (Hafner et al., 2025) ainsi qu'en version Excel, fournissant des estimations fiables de réductions relatives plus que des valeurs absolues.

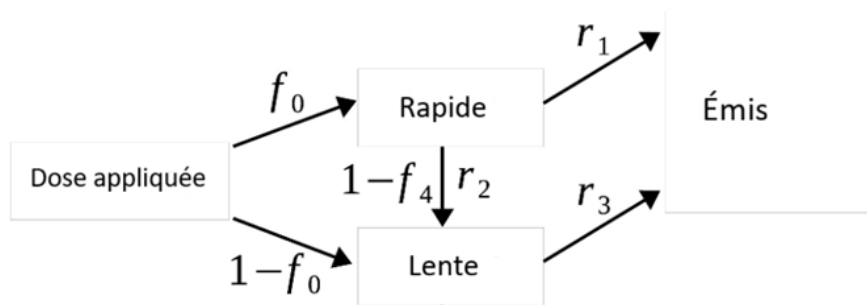


Figure 6. Structure du modèle d'émission d'ammoniac ALFAM2 (Adapté de Hafner et al., 2019).

3.6.3 Les émissions de N₂O

3.6.3.1 Processus de dénitrification

Il est établi que des températures froides engendrent un ralentissement et une baisse des populations biologiques du sol. En effet, il y a une baisse des bactéries oxydant l'ammonium et certaines autres bactéries oxydant ou réduisant les nitrites. La mort de ces microorganismes crée alors la libération d'éléments nutritifs tels que les nitrates ou l'ammoniac, mais sous des conditions anaérobiques, ces éléments pourraient se voir transformés en protoxyde d'azote (N₂O).

Les conditions météorologiques particulières au Québec (précipitations abondantes, fonte des neiges, formation de glace) engendrent des situations où l'oxygène du sol devient plus limité, favorisant ainsi les conditions de sol plus propices au développement de la flore dénitrificatrice et à la dénitrification (Gamache, 2014). Afin de limiter le plus possible les situations d'anaérobioses engendrées par les précipitations ou la fonte des neiges, il est capital de maintenir les sols agricoles en santé. Pour ce faire, un chaulage adéquat aidant à maintenir une agrégation et l'aération du sol favorise une bonne activité biologique (FABQ, 2005).

Bien que les conditions climatiques automnales (températures froides, précipitations abondantes) puissent favoriser la dénitrification, la fonte des neiges au printemps a généralement plus d'impact sur les émissions de GES (OAQ, 2006). À l'automne, comparativement au printemps, le contenu en eau du sol est relativement faible, ce qui permet encore les échanges gazeux et la présence d'oxygène. Les microorganismes nitrifiants s'affairent alors à l'accumulation de nitrates. Toutefois, ces nitrates accumulés pourraient par la suite être transformés en protoxyde d'azote sous des conditions anaérobies. Cette situation survient parfois au printemps lorsque la saturation en eau du sol est plus élevée et que la température se réchauffe, favorisant ainsi une reprise plus active de l'activité biologique du sol (Gamache, 2014).

Par ailleurs, Risk et al. (2013) ont démontré que plus la durée du gel est longue, plus les émissions de N₂O lors du dégel sont grandes. Plusieurs autres études citées par Gamache (2014) ont rapporté une augmentation des émissions de N₂O lorsque les températures du gel sont plus basses.

3.6.3.2 Modélisation des émissions de N₂O

Les émissions de N₂O au champ, causées par la fertilisation azotée, peuvent être calculées conformément aux recommandations du GIEC, mais adaptées à une méthode spécifique nationale (Tier 2) plus représentative des conditions canadiennes. La méthodologie, présentée à la section A3.4.5 de la partie 2 du rapport d'inventaire national canadien (ECCC, 2025), prend en compte plusieurs facteurs influençant les émissions, notamment le climat, les types de sol, le type d'engrais, la topographie et les pratiques agricoles. Toutefois, les conditions météorologiques au moment de l'épandage ne sont pas considérées dans le calcul.

Les émissions de N₂O du sol sont divisées en deux grandes catégories :

- Émissions directes : issues de la transformation microbiologique de l'azote ajouté au sol (par engrais minéraux, organiques ou résidus de culture). Ces émissions résultent surtout du processus de dénitrification et sont influencées par l'état de l'oxygène dans le sol.

- Émissions indirectes : liées à la volatilisation de NH_3 et NO_x et à leur dépôt ultérieur, ainsi qu'au lessivage et au ruissellement de formes d'azote vers les eaux souterraines, suivis de transformations produisant du N_2O . C'est pourquoi les pratiques limitant la volatilisation de l'azote sous forme de NH_3 vont permettre de réduire de façon indirecte les émissions de GES.

3.6.3.3 Facteurs influençant les émissions de N_2O

Leytem et al. (2019) ont étudié l'impact de l'application de fumier par rapport à celui d'engrais minéraux sur les émissions de N_2O sur des terres irriguées. Globalement, l'étude a permis de déterminer que les émissions de N_2O sont plus grandes dans les situations où les températures sont plus chaudes et à la suite de l'irrigation (comparable à une pluie). D'ailleurs, le coefficient d'émission utilisé dans le modèle d'ECCC (2025) afin de déterminer les émissions de N_2O augmente avec la quantité de pluie reçue pendant la saison de croissance (Figure 6). Afin de tenir compte des émissions de N_2O hors de la saison de croissance, un coefficient de rapport de 1/0,645 est également appliqué au modèle, considérant que 64,54 % des émissions sont produites pendant la saison de croissance (Pelster et al., 2022).

Une corrélation entre les variables liées à la texture du sol et les émissions de N_2O des sols agricoles est souvent observée. (ECCC, 2025). Les sols de texture grossière émettent moins de N_2O que les sols à texture fine (Figure 7). L'approche préconisée dans le modèle d'ECCC (2025) a été d'appliquer des coefficients de rapport de 0,49, 1,0 et 2,55 à l'échelle nationale aux sols de texture grossière, moyenne et fine, respectivement.

Le type d'engrais influence également les émissions. Le modèle d'Environnement et changement climatique Canada (2025) considère un facteur de 0,84 pour les émissions de N_2O pour les cultures annuelles fertilisées avec un engrais organique comparativement à un engrais inorganique. De plus, le facteur d'émission est multiplié par un facteur de 0,19 pour la fertilisation de cultures pérennes comparativement à des cultures annuelles.

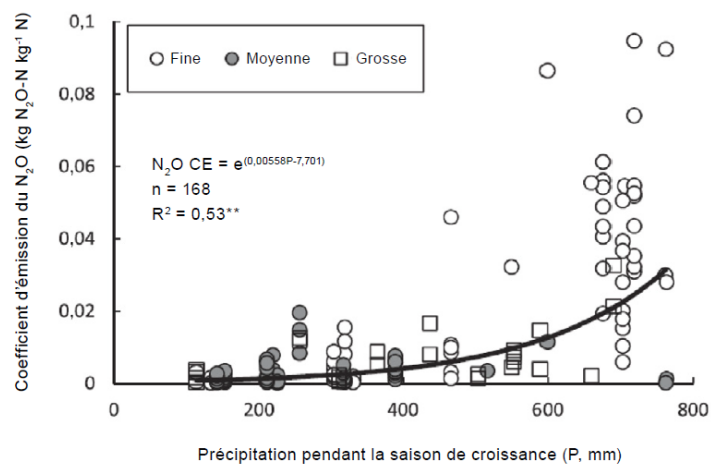


Figure 7. Coefficient d'émissions de N_2O en fonction des précipitations pendant la saison de croissance (P) dans les sols de texture fine, moyenne et grossière. Tiré de ECCC (2025).

3.6.4 Ruissellement et lessivage de l'azote

L'étude de Kleinman et al. (2006) a suivi les pertes par ruissellement lors de deux séries de simulations de pluie, l'une réalisée en mai et l'autre en septembre, afin d'évaluer la réponse du ruissellement dans des conditions printanières humides et estivales sèches. L'expérience a été menée sur un versant composé de deux types de sols, sur lequel une plantation de luzerne et de dactyle pelotonné avait été implantée l'année précédant les essais. Le terrain avait également reçu du fumier de poule l'année précédente, et un fertilisant minéral a été incorporé dans le sol avant l'implantation de la culture.

Les résultats montrent que les pertes de nutriments et le ruissellement étaient plus élevés en mai qu'en septembre. Il n'existe toutefois pas de lien direct entre la teneur en azote du sol et les concentrations d'azote perdues par ruissellement, puisque le sol le moins riche, mais le plus saturé en eau, a présenté le plus de ruissellement sans entraîner davantage de

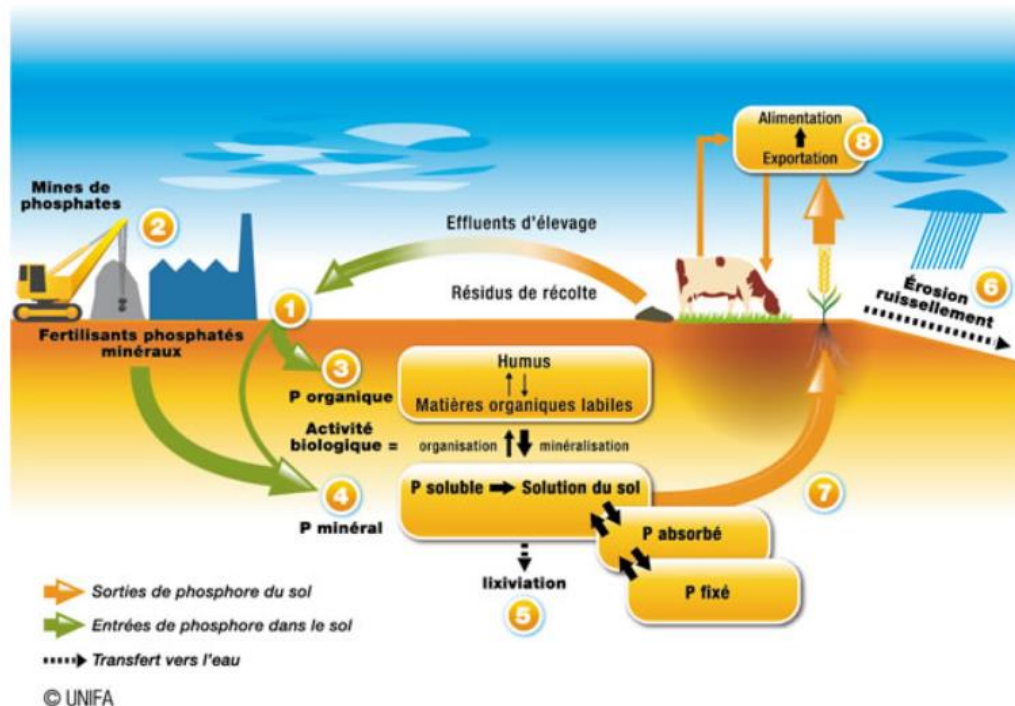
pertes d'azote proportionnelles. Par ailleurs, l'intensité de la pluie tend à diminuer la concentration en nitrate dans l'eau de lessivage, un effet attribuable à la dilution, ce qui indique que, malgré un ruissellement accru, l'intensité de la pluie n'influence pas significativement les pertes d'azote. Ces observations suggèrent que le ruissellement n'est pas le principal facteur de perte d'azote dans ce contexte.

3.7 Mécanismes causant les pertes de phosphore et impact des conditions météorologiques

3.7.1 Le cycle du phosphore

Le phosphore est un élément essentiel à la croissance des plantes. Il intervient entre autres sur la germination, sur le développement du système racinaire ou la maturation des fruits. Il se retrouve dans le sol sous des formes solubles (orthophosphates) et non solubles. Les ions orthophosphates sont ceux qui peuvent être prélevés par la plante. Toutefois, il faut savoir que le phosphore est rapidement fixé aux colloïdes du sol ou à la matière organique à la suite de son application. Il n'y en a donc qu'une petite partie qui demeure disponible rapidement pour les besoins des plantes, alors que ce qui est sous forme solide fixé dans le sol pourra en partie être dissous dans la solution du sol avec le temps et se retrouver disponible pour la plante. Comme une grande proportion du phosphore qui se retrouve fixé dans le sol, il survient des situations d'accumulation et même de saturation des sols en phosphore. Sachant que le phosphore se retrouve fixé au sol ou sous une forme soluble, les risques de pertes sont associés au ruissellement de surface, à la lixiviation ou encore à l'érosion du sol. Les facteurs météorologiques qui auront le plus d'impact sur les pertes associées au phosphore sont la pluie et le vent (Figure 8) (Unifa, 2024 et CRAAQ, 2010).

Selon l'UNIFA, 22 % du phosphore se retrouvant lixivié dans les eaux proviendrait de l'agriculture. De ce nombre, 17,5 % proviendraient des engrais organiques et 4,5 % des engrais minéraux (Unifa, 2024).



1. Le recyclage d'éléments nutritifs contenus dans les matières organiques de toute nature : effluents d'élevage, résidus de culture et autres sous-produits organiques issus des activités humaines, constitue une ressource importante pour la fertilisation.
2. Le phosphate est extrait de mines à ciel ouvert, il est généralement transformé par l'action d'acides minéraux pour produire des formes plus solubles, assimilables par les plantes.
3. La minéralisation de la matière organique du sol (et des effluents) produit du phosphore minéral (phosphate) soluble.
4. Le phosphore évolue en permanence entre les formes fixées, adsorbées et solubles.
5. La lixiviation du phosphore soluble (entraînement en profondeur par l'eau du sol) est un phénomène extrêmement limité (moins de 1kg/ha en situation de fertilisation raisonnée).
6. L'entraînement du phosphore hors de la parcelle est faible, il se fait par ruissellement (terrains en pente) et érosion (phosphore lié aux particules solides).
7. L'absorption racinaire des végétaux se fait exclusivement à partir du phosphore de la solution du sol.
8. La récolte est transformée en nourriture (humaine ou animale), ce qui est l'objectif fondamental de l'agriculture.

Figure 8. Cycle du phosphore (Tiré de UNIFA, 2024).

3.7.1 Mécanismes causant les pertes de phosphore

3.7.1.1 Ruissellement

Le ruissellement du phosphore après un épandage est influencé par plusieurs facteurs autres que la météo : le type de sol, l'humidité du sol, la proximité de la nappe phréatique, la pente, etc. Il est donc impossible de relier uniquement un élément météo aux pertes par ruissellement de phosphore. Toutefois, certaines conclusions ont pu être observées au travers des études.

La revue de littérature réalisée par Hart et al. (2004) présente différentes études dont le pourcentage de pertes de phosphore par rapport à ce qui a été appliqué varie entre 0,2 et 42 % selon l'usage des terres, le type de fertilisant phosphaté ou encore la présence de système d'irrigation.

Hanrahan et al. (2009) ont fait des essais sur l'intervalle de temps entre une application de fertilisant et l'évènement de pluie subséquent s'en suivant. Ils ont pu observer qu'il y avait une diminution de 89% des pertes de phosphore total et de 65 % du phosphore réactif soluble lorsqu'il y avait un écart de 5 jours plutôt que de deux entre la pluie et l'application de fumier.

O'Rourke et al. (2021) ont aussi réalisé des essais de simulation de pluies selon un intervalle dans le temps (2, 4, 10, 18, 30 et 49 jours) à la suite de l'application de lisier de vaches laitières. Ils ont pu constater que les concentrations de phosphore

soluble et total dans les eaux de ruissellement étaient significativement moins élevées lors d'évènement de pluie survenant au jour 18 post épandage. Les concentrations dans les eaux de ruissellement étant pratiquement 3 fois plus élevées au jour 2 post épandage comparativement au jour 18 (diminution graduelle entre le jour 2 et 18).

Tabbara (2003) a travaillé sur l'influence de différents paramètres tels que la source de fertilisant (minéral ou organique), la méthode d'application (en surface ou incorporé) et le taux d'application sur les pertes de phosphore réactif dissous, de phosphore total et de phosphore disponible. Bien que l'étude ne fasse pas ressortir l'impact de différents facteurs météorologiques sur les pertes de phosphore encourues, des conclusions sont tirées à l'effet que :

- l'incorporation diminue le ruissellement, mais augmente le risque de perte par érosion du sol;
- l'application de lisier augmente le ruissellement comparativement aux fumiers en raison d'un effet scellant en surface;
- le bénéfice de diminution des pertes grâce à l'incorporation est surtout efficace avec les engrais organiques, davantage qu'avec les engrais minéraux.

Ainsi, même s'il est avantageux, pour les engrais organiques, de planifier un épandage plusieurs jours avant une pluie importante afin de limiter les pertes de phosphore, la dynamique de volatilisation de l'azote obéit à une logique différente. Dans ce cas, une pluie modérée survenant peu de temps après l'application sur une culture établie contribue plutôt à réduire les pertes ammoniacales. En l'absence de précipitations, l'incorporation demeure toutefois la stratégie la plus efficace pour limiter les pertes d'azote lors d'un épandage réalisé en pré-semis ou après la récolte (O'Rourke et al., 2022 et Hart et al., 2004).

Kleinman et al. (2006) ont étudié l'influence de l'intensité de la pluie et de l'hydrologie sur le ruissellement du phosphore. L'étude a été menée sur deux sites d'un même bassin versant présentant des types de sols et des pentes différentes, équipés de dispositifs de collecte des eaux de ruissellement au bas des parcelles. Deux séries de simulations de pluie, l'une en mai et l'autre en septembre, ont été réalisées afin d'évaluer la réponse du ruissellement dans des conditions printanières humides et estivales sèches.

Les résultats montrent qu'un sol plus saturé en eau entraîne des pertes de phosphore par ruissellement plus importantes, même lorsque sa teneur en phosphore est inférieure. Une pluie plus intense génère du ruissellement plus rapidement, mais la proportion de pluie transformée en ruissellement reste similaire, que la pluie soit forte ou modérée.

Il a également été observé que les concentrations en phosphore soluble et non soluble étaient plus élevées en septembre qu'en mai, ce qui s'expliquerait par une plus grande disponibilité en phosphore soluble liée à la biomasse végétale présente à cette période. Cependant, ces concentrations plus élevées n'ont pas eu d'effet significatif sur les pertes totales par ruissellement. Lors de pluies consécutives sur deux jours, les concentrations en phosphore étaient moins élevées le deuxième jour, suggérant un effet de dilution. Enfin, l'intensité de la pluie a tendance à augmenter les concentrations de phosphore dans le ruissellement, tandis qu'elle agit de manière inverse pour les concentrations en nitrates.

3.7.1.2 Lessivage

Comme pour le ruissellement, le lessivage du phosphore est influencé par plusieurs autres facteurs que des facteurs météorologiques, dont le type de fertilisant, le taux d'application, le pH du sol, la culture, etc. (Weaver et Ritchie, 1994). Bien que le lessivage du phosphore ne soit pas le plus grand facteur de perte, il a été établi par Elrashidi et al. (2001) que sur des sols sableux qui sont plus poreux, le phosphore soluble est plus difficilement retenu et que de fortes pluies peuvent engendrer une migration du phosphore vers la nappe phréatique, engendrant ainsi des pertes par lixiviation. Il en serait de même pour le phosphore retenu sur les colloïdes du sol qui serait également lessivé à travers les macropores des sols sableux. Elrashidi et al. (2001) dosait en surface du sol (premiers 30 cm de profondeur) et en profondeur (profondeur de saturation variable selon le sol) des valeurs beaucoup plus élevées de phosphore que dans les couches centrales du profil de sol, indiquant ainsi que le phosphore appliqué en surface était en premier lieu retenu en surface, mais qu'il y avait une migration de celui-ci, ainsi que de l'aluminium avec lequel il forme des complexes, en profondeur.

Bien que l'étude de Elrashidi et al. (2001) parlait majoritairement du lessivage de la forme particulaire de phosphore dans les sols sableux, l'étude de Riddle et al. (2018) note une plus grande concentration de la forme soluble de phosphore dans ses essais de lixiviation sur le phosphore. Dans son cas, pour une pluie simulée en laboratoire sur la colonne de sol 0-20 cm de profondeur, 75 % du phosphore total lessivé était sous forme d'orthophosphates. Pour les couches de sol plus en profondeur, il y avait effectivement plus de phosphore particulaire lessivé, mais la majorité du phosphore était toujours sous forme soluble.

Xue et al. (2013), on fait des essais en champs sur la lixiviation du P hors saison de culture en relation avec le fait d'appliquer ou non du lisier de porcs, avec l'effet de fortes ou de faibles pluies. Avec des mesures dans le temps aux jours 9 et 53, il a été démontré qu'il y avait de plus fortes concentrations en phosphore réactif soluble et en phosphore total dans les lixiviats au jour 53 sur les terres ayant reçues du lisier, indépendamment de la quantité de pluie reçue. Toutefois, les concentrations de ces deux formes de phosphore sont beaucoup plus élevées dans les lixiviats pour les essais avec fortes pluies. L'intensité de la pluie n'a cependant pas démontré d'effet significatif sur les concentrations en phosphore total lixiviées dans les cas où aucun lisier n'avait été appliqué, et ce même si les sols étaient à la base, relativement saturés en phosphore.

3.7.1.3 Érosion du sol

L'érosion du sol provoque la perte de la couche superficielle de sol (sol arabe) entraînant par le fait même la matière organique du sol et les nutriments. Elle peut engendrer des pertes économiques liées aux pertes de rendements des cultures et également entraîner l'eutrophisation des milieux lorsque les particules de sol se retrouvent dans l'eau. L'érosion peut se produire via 3 processus; soit l'érosion hydrique, l'érosion éolienne et l'érosion due au travail de sol. L'érosion hydrique et éolienne résulte principalement des conditions météorologiques, notamment le vent, les précipitations et les périodes de sécheresse. Elle demeure toutefois modulée par des facteurs externes tels que la couverture du sol, qu'il s'agisse d'une jachère, d'une culture annuelle ou d'une prairie (Xue et al., 2013).

Les pertes de phosphore liées à l'érosion résultent principalement du transport des colloïdes du sol, qui retiennent les formes particulaires de phosphore. Plusieurs études ont cherché à quantifier ces pertes. Alewell et al. (2020) présentent une synthèse des pertes de phosphore causées par l'érosion dans différentes régions du monde et estiment qu'en Amérique du Nord, elles atteignent 39,5 %.

Dans une étude menée en Angleterre et au Pays de Galles (Chambers et al., 2000), il a été déterminé que l'occurrence de l'érosion hydrique est entre 31 et 43 % des épisodes de pluie annuels et qu'elle se produit majoritairement entre octobre et janvier. Ces événements de pluies qui causent de l'érosion sont de plus de 15 mm/j avec une intensité de plus de 4 mm/h. Il est à noter que l'érosion se produit davantage dans les vallées (où l'accumulation d'eau est plus importante), sur les sols peu couverts (labours ou cultures annuelles) ou sur les surfaces compactées. Dans leurs essais, la moyenne des pertes de sol par érosion sur les terres labourées était de 2300 mg/an, ce qui correspond à 18 % du phosphore perdu. En moyenne, les pertes de phosphore étaient de 14,6 kg/ha pour des sols qui avaient des teneurs en phosphore d'environ 860 mg/kg et 40 % de ces pertes se retrouvaient dans l'eau, accentuant ainsi les risques d'eutrophisation des milieux.

Quinton et al. (2001) s'est intéressé à l'incidence des petits et des gros événements d'érosion (événements qui créent un écoulement). La grosseur de l'événement est relative par rapport aux autres événements. Ainsi, plusieurs événements de pluies avec des intensités (mm/h) et des durées (minutes que dure l'écoulement) variables ont été évalués. Les plus gros événements sont ceux qui ont généré le plus d'écoulement ou qui étaient les plus intenses. Selon ces travaux, les petits événements d'érosion valent pour 50 % du sol perdu, mais 80 % du phosphore perdu. De plus, 50 % du phosphore perdu l'a été dans les 25 plus petits événements. Il souligne également une forte corrélation entre la proportion d'argile dans les sédiments érodés et les concentrations en phosphore qui y sont dosées. Il ressort de cette étude que même les plus petits épisodes générant de l'érosion sont responsables de grandes pertes de phosphore par érosion.

Bien que Munch et al. (2022) n'aient pas directement fait de recherche sur les pertes de phosphore causées par l'érosion éolienne, leur étude s'est intéressée à l'impact de l'érosion éolienne sur un sol sableux fertilisé ou non avec du fumier de poulet séché. En raison de la masse volumique du fumier de poulet, celui-ci était susceptible à l'érosion éolienne. Ainsi, ils ont déterminé que même avec un vent de 8 m/s (environ 29 km/h), les pertes de carbone total associées à l'érosion éolienne sur un sol sableux avec fumier de poulet sont déjà augmentées par rapport à un sol sans l'apport de fumier. Ce constat est

aussi valide pour des vents de plus grandes intensités. Il ressort également de cette étude que l'érosion éolienne a le potentiel de réduire les bénéfices associés à la santé des sols par un amendement organique léger (fumier de poulet séché, compost), mais les conditions propres à l'érosion éolienne ne se produisent pas tout le temps, ni tout de suite après l'application d'un engrais organique léger.

3.8 Sources de données météorologiques à l'échelle du marché

3.8.1 Stations météorologiques

Les stations météorologiques sont constituées d'un ensemble de capteurs mesurant, en temps réel, les conditions atmosphériques de l'air au point où ils sont positionnés. Les lectures prises par les stations sont considérées comme le standard de référence en science de l'atmosphère et sont à la base des modèles de prévisions numériques. Elles ont l'avantage d'être fiables dans leur mesure et précises, pourvu qu'elles soient adéquatement installées et entretenues. Actuellement, les études agronomiques utilisent souvent les données provenant de stations météorologiques puisqu'il est reconnu qu'elles représentent les mesures les plus proches de la réalité (Tarek et al., 2020). Les données issues des stations ne sont pas pour autant parfaites. Les stations météorologiques sont sensibles aux erreurs de mesures, aux données manquantes ou aux mauvaises calibrations. Pour contrer ces difficultés, des efforts considérables doivent être déployés afin d'obtenir des données de bonne qualité, mais des erreurs peuvent tout de même échapper aux contrôles (Menne et al., 2010).

En plus de l'erreur possible sur les observations, il est important de comprendre que les données des paramètres météo habituels conduisent aussi à l'évaluation de paramètres dérivés, avant leur intégration dans les modèles bioclimatiques. Par exemple, la durée d'humectation, un paramètre important pour plusieurs modèles en phytoprotection, n'est pas un paramètre météorologique standardisé et n'est donc pas mesurée par la plupart des stations météorologiques. En l'absence d'une telle mesure, la durée d'humectation doit donc être dérivée à partir des données fournies par autres capteurs. Les stations météorologiques sont utiles et pertinentes, mais il est important de comprendre les limites de leur utilisation.

Par ailleurs, dans le cas de données manquantes et dans un souci d'uniformité, ce sont parfois des estimations provenant d'autres stations qui sont utilisées comme substitut. Cela peut être particulièrement problématique pour les précipitations qui fluctuent grandement dans l'espace et il arrive donc fréquemment qu'une station située dans les champs d'un producteur n'enregistre pas les mêmes données que la station publique la plus proche (Toreti et al., 2019).

3.8.2 Réseaux météorologiques existants au Canada

3.8.2.1 Stations publiques

Les stations opérées par la Financière agricole du Québec (FADQ) sont en partie un héritage des réseaux historiques du secteur de production horticole. Au moment d'écrire ces lignes, la FADQ détient plus de 88 stations météorologiques et vise à avoir une couverture optimale du territoire québécois. La totalité des stations météorologiques a des capteurs de température, de précipitations et de vent (anémomètres). Certains ont des capteurs de radiation solaires et des capteurs de sol.

Le service météorologique du Canada (SMC) est une division d'Environnement et changements climatiques Canada (ECCC) responsable de la recherche et de la publication d'informations météorologiques et de prévisions météorologiques. Le SMC est un important fournisseur de données par stations météorologiques sur le territoire agricole du Québec avec plus de 80 stations réparties sur l'ensemble du territoire. Les paramètres mesurés par les stations du SMC sont la température, la pluie, la vitesse et direction du vent à 10 m, la pression atmosphérique et l'humidité relative. La plupart des stations ne mesurent pas la hauteur de la neige, la température sur ou dans le sol et la radiation. Le SMC de ECCC est le plus grand fournisseur de données météorologiques au Canada. Une panoplie de ses produits sont disponibles gratuitement et un service de traitement est également disponible pour des besoins spécifiques. Les données peuvent être utilisées pour des fins lucratives, pourvu que celles-ci respectent la licence d'utilisation. Depuis l'été 2019, le SMC publie une documentation détaillée et facilement compréhensible pour les différents produits disponibles. Ce site offre notamment une description des produits offerts, des exemples d'utilisations, des métadonnées ainsi que des indications complémentaires sur la licence

et une foire aux questions. Il existe plusieurs façons d'accéder aux données et celles-ci varient selon les besoins de l'utilisateur. L'ensemble des données brutes sont regroupées à l'intérieur du Datamart (<https://dd.weather.gc.ca/>), qui est un service internet permettant de télécharger des données météorologiques en temps réel.

Le ministère de l'Environnement, de la Lutte aux changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) répertorie plus de 200 stations météo sur son site internet. Les données y sont facilement accessibles et présentent la température et les précipitations.

Le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP), la SOPFEU, Rio Tinto et Hydro-Québec possèdent également 20-30 stations au total, peut-être même plus, mais surtout dans des milieux boisés et dans le nord du Québec. Celles-ci sont accessibles, mais il n'existe pas d'infrastructure pour y avoir accès facilement.

3.8.2.2 Stations privées

Le principal désavantage des stations météorologiques réside dans le fait que leurs lectures ne représentent qu'un seul point dans l'espace. Une aire de représentativité pour chaque paramètre mesuré peut être définie et, lorsqu'un point géographique désiré est trop loin d'une station, des données alternatives peuvent être considérées. De ce fait, certains optent pour l'installation de stations météorologiques privées.

L'installation, l'entretien et le choix d'équipement pour les stations sont d'une complexité qui n'est pas apparente à première vue. Plusieurs compagnies vendent des stations météorologiques que les producteurs peuvent acheter, à différents prix et à différents niveaux de qualité. Afin que les données météorologiques récoltées soient fiables, il est impératif de bien suivre les démarches d'installation de la station. Par exemple, pour obtenir une lecture fiable de la vitesse et direction des vents, les lieux doivent être bien dégagés et la station doit être située à une distance normée du couvert forestier pour éviter que les mesures de l'anémomètre ne soient affectées par un obstacle local.

La plupart des fournisseurs offrent une plateforme en ligne pour visualiser les conditions actuelles, mais certains demandent un abonnement pour accéder aux données historiques. Il existe des plateformes en ligne, notamment WeatherUnderground, où les utilisateurs de stations personnelles peuvent connecter leurs stations personnelles. Les données historiques et actuelles sont déposées sur ces plateformes et les données des autres utilisateurs peuvent aussi être consultées. Une API (Interface de Programmation d'Applications) permet d'accéder en temps réel aux données des utilisateurs ayant connecté leur station personnelle à la plateforme.

3.8.2.3 Autres sources de données météorologiques ou climatiques

Agrométéo Québec est un outil web très complet développé par le CRAAQ qui donne accès aux producteurs agricoles à des prévisions météorologiques, ainsi qu'à l'état des lieux en ce qui concerne la météo qui a réellement eu lieu dans les dernières heures, et ce en fonction de la situation géographique souhaitée. Le site d'Agrométéo Québec présente également l'Atlas agroclimatique qui fournit de l'information climatique orientée pour le secteur agricole sous forme de cartes. Il est possible d'y retrouver les impacts du climat actuel et futur sur les activités agricoles. Plusieurs onglets spécifiques à une culture donnée sont aussi présents pour aider à gérer certains aspects spécifiques à une culture donnée (ex : indice de fusariose dans le blé, utm cumulé).

3.8.3 Données climatiques

Plusieurs sources permettent de trouver des données climatiques à l'échelle mondiale et de manière plus locale. Des sites tels que; climate-data.org, environnement et changements climatiques Canada, donneesclimatiques.ca, l'Atlas climatique du Québec, l'Atlas climatique du Canada, Ouranos, etc., permettent de trouver de l'information tels que les tendances climatiques ou encore des statistiques sur les changements climatiques.

4 Consultations des acteurs du milieu

4.1 Professionnels du milieu

Afin de mieux connaître la réalité entourant le moment opportun pour l'épandage d'engrais organique, 5 professionnels de divers milieux ont été consultés en visioconférence. Parmi eux se retrouvent des conseillers (souvent agronomes) de clubs conseils, du MAPAQ et d'organisations privées. Toutes les consultations ont eu lieu à l'été et l'automne 2024. En Annexe 1 se trouvent les questions de base ayant servi aux consultations de professionnels. Les prochaines lignes résument l'ensemble de l'information obtenue dans ces consultations.

La réalisation du Plan agroenvironnemental de fertilisation (PEAF) par les agronomes est généralement faite entre les mois de novembre et avril. À cette période, il est impossible de prévoir exactement les conditions météorologiques au moment des épandages prévus au plan de fertilisation. Les recommandations ne sont donc pas directement faites en considérant les conditions météorologiques. Toutefois, tel qu'énoncé à la section 3.4 du présent rapport, les agronomes recommandent certaines considérations de base aux producteurs, par exemple, ne pas épandre sur un sol gelé ou enneigé, incorporer dans un délai de 24h les engrais épandus sur sol à nu, éviter d'épandre avant des pluies substantielles, faire attention au ruissellement pour les épandages sur les parcelles en pentes, etc. Le fardeau de juger du bon moment en considération des conditions météorologiques lors de l'épandage repose donc sur les épaules des producteurs. Les agronomes demeurent toujours disponibles pour les conseiller en cas de besoin, mais il ne serait pas réaliste que les plans de fertilisation soient révisés chaque semaine pour prendre en compte les conditions météorologiques.

D'une certaine façon, tous les agronomes qui réalisent des plans de fertilisation prennent en compte la volatilisation de l'azote, car ils s'appuient tous sur le guide de référence en fertilisation du CRAAQ et ce dernier en tient compte pour les engrais organiques avec les coefficients d'efficacité. Une agronome mentionnait toutefois que de tels coefficients devraient aussi exister pour les engrais minéraux. Pour ce qui est des GES, ils ne sont pas considérés dans les recommandations à l'heure actuelle.

Un agronome nous mentionnait que la plupart de ses gros producteurs maraîchers ou producteurs de pommes de terre avaient une ou plusieurs stations météo directement sur leurs entreprises. Cela leur permet de mieux prendre en compte les conditions réelles de météorologie sur leurs terres.

Sinon, les différents experts consultés revenaient surtout sur le facteur pluviométrie, qui est à considérer plus particulièrement lors de l'épandage. La pluie vient limiter l'accès au champ pour des considérations de portance du sol, parce que la compaction en profondeur d'un champ peut venir diminuer les rendements des cultures sur plusieurs années subséquentement à un épandage avec de la machinerie lourde sur un sol trop humide. Pour juger de la portance du sol, une considération différente sera apportée à un sol sableux qui se ressuit plus rapidement par rapport à un sol argileux. Sinon, dans les cas d'épandage de surface (entre les coupes de foin, en post levée), il est souhaitable d'avoir une pluie suivant l'épandage pour venir pallier l'incorporation qui est impossible. Cette pluie limitera les pertes par volatilisation et la propagation des odeurs. Dans le cas de prairies, la pluie viendra aussi limiter les risques de retrouver des pathogènes pouvant nuire à l'alimentation ou à l'ensilage dans la récolte. Pour déterminer le moment idéal pour épandre dans ces situations en pleine saison de culture, bien qu'une considération soit portée aux précipitations (portance, incorporation par la pluie), ce sont davantage des facteurs externes comme la repousse de la prairie ou les autres tâches à accomplir sur la ferme qui vont peser dans la décision.

Les dérogations pour épandre après le 1^{er} octobre, comme le stipule l'article 31 du REA, ne sont pas rares. Elles sont demandées par les producteurs à l'approche de la date butoir quand les chantiers d'épandage n'ont pas pu être complétés et elles peuvent même être prévues d'avance dans certain cas comme pour l'épandage après une récolte de maïs grain. Dans ces cas, l'agronome PAEF pourra spécifier certaines obligations en regard des risques de ruissellement, comme celle d'incorporer l'engrais ou encore de ne pas épandre si le sol est gelé ou enneigé.

Les producteurs accordent généralement moins d'attention au vent lorsqu'ils planifient l'épandage de fumier. Même si cette information est pertinente pour évaluer le temps de séchage en vue d'une récolte, le vent n'est habituellement pas considéré comme un facteur influençant directement les pertes de nutriments lors de l'épandage. Il est plutôt pris en

compte pour anticiper la dispersion des odeurs vers les zones sensibles, sans toutefois constituer un véritable facteur limitant dans la majorité des situations.

Lors d'événements météorologiques extrêmes comme les sécheresses ou les canicules, les recommandations d'épandage doivent être réévaluées. Comme les plantes subissent déjà un stress important, il n'est pas souhaitable d'ajouter un stress supplémentaire lié à un apport de fertilisants organiques. Il serait également pertinent de mieux quantifier les pertes potentielles associées aux températures élevées, notamment la volatilisation de l'azote, afin d'ajuster les recommandations d'épandage en conséquence et d'optimiser à la fois l'efficacité fertilisante et la protection de l'environnement.

Comme il existe déjà plusieurs fiches techniques, les experts estiment qu'il ne s'agit pas du moyen le plus efficace pour rejoindre les producteurs et conseillers au sujet de l'influence des conditions météorologiques sur les pertes par volatilisation ou sur les émissions de GES. Il est suggéré de présenter l'information en reliant les bonnes pratiques d'épandage à un gain économique ou en allant rejoindre les valeurs des producteurs et leur vision de l'agriculture (ex : désir de diminuer les GES). Une agronome suggérerait même de faire des diagnostics pour faire prendre conscience des impacts auprès des producteurs plutôt que de faire de la prévention. Toutefois, pour les mêmes raisons qu'il est impossible pour les agronomes de refaire constamment les recommandations du plan de fertilisation, il est peu réaliste de penser faire des diagnostics pour tous les producteurs.

4.2 Producteurs agricoles

Dans le cadre du projet de laboratoire vivant Racines d'avenir, 14 producteurs ont été sondés concernant leurs pratiques. Trois questions ont été ajoutées afin de comprendre de quelle façon les facteurs météorologiques influencent leurs pratiques d'épandage.

Question 1 : Quels sont les critères considérés pour faire un épandage?

Le critère de première importance pour les producteurs dans leur décision d'épandre ou non est la portance du sol. Bien que ce critère soit lié à la météo, les préoccupations pour la portance du sol sont davantage pour une question de santé des sols (compaction) et non d'émissions.

Dans certains cas, les critères considérés en priorité pour déterminer où et quand ils vont épandre sont autres que météorologiques, comme : la saturation du sol en P, le type de culture, la disponibilité du forfaitaire ou la localisation des parcelles.

Question 2 : Considérez-vous des facteurs météorologiques comme la température, vitesse du vent, pluie, etc?

Certain vont considérer la pluie après l'épandage afin d'assurer une bonne incorporation et éviter de souiller le feuillage de la récolte. Encore une fois, il ne s'agit pas de préoccupation en lien avec les émissions. À la lumière des informations recensées, les précipitations sont le facteur météorologique le plus pris en considération pour les épandages, mais pour des raisons autres que le potentiel de perte.

Question 3 : Utilisez-vous des outils ou services météo pour décider du meilleur moment d'épandre les engrais (organiques et minéraux)? (station météo perso, appli météo)

Les producteurs utilisent différents outils de prévisions météorologiques pour les connaître, dont particulièrement Météomédia.

De plus, une trentaine de courriels ont été envoyés à différents producteurs que nous avons dans nos banques de données et trois réponses nous ont été transmises. Les questions posées figurent à l'Annexe 2.

En résumé, indépendamment du type d'engrais appliqué, la portance du sol constitue le principal critère considéré par les producteurs lors de la planification des épandages. Le type de culture représente également un facteur déterminant, afin d'assurer une adéquation entre l'apport en éléments nutritifs et les besoins de la plante. Parmi les variables météorologiques, les précipitations sont celles auxquelles les producteurs portent la plus grande attention, alors que des paramètres tels que la vitesse du vent et la température sont généralement considérés comme secondaires dans la

hiérarchisation des décisions. Pour s’informer des conditions et des prévisions météorologiques, les producteurs s’appuient majoritairement sur des sources publiques, notamment les plateformes Agrométéo et Météomédia.

Les producteurs rencontrés démontrent une bonne compréhension des facteurs susceptibles d’accroître les pertes par émissions gazeuses lors de l’épandage et cherchent à en limiter les impacts. Cette volonté de réduire les pertes environnementales, qu’il s’agisse des émissions atmosphériques ou du lessivage des nutriments, s’accompagne également d’un bénéfice économique pour eux, puisque la diminution des pertes se traduit par une meilleure valorisation des fertilisants et une réduction du gaspillage.

5 Outil d’aide à la décision (OAD)

5.1 Élaboration de l’OAD

À la suite des consultations réalisées auprès des producteurs et des professionnels, ainsi qu’une consultation auprès de la Commission agrométéorologie du CRAAQ sur les orientations du projet, deux aspects particuliers sont ressortis et ont mené à l’élaboration de l’outil d’aide à la décision présenté. Dans les commentaires des professionnels, il a été mentionné que pour être en mesure de rejoindre et d’intéresser les producteurs, il serait pertinent de relier les pertes de fertilisants avec la valeur économique que cela représente. Du côté de la Commission, il a été suggéré de se concentrer sur les pertes par volatilisation de l’azote qui représentent la majorité des pertes encourues lors de l’épandage. Ainsi, l’outil d’aide à la décision (OAD) élaboré dans le cadre de ce projet tient compte des pertes d’azote ammoniacal sous forme de volatilisation ainsi que de la valeur économique de ses pertes sur la base du coût des engrais minéraux azotés.

L’outil repose sur des données issues de simulations générées avec le modèle ALFAM2 (Version 3.10 – Format Excel) décrit précédemment dans la section 3.6.2.4.3. Ces données regroupent les résultats d’émission simulés selon différents paramètres clés, dont la température, la vitesse du vent, la technique d’épandage (aspersion basse ou pendillards), le type de lisier (bovin laitier ou porcin) ainsi que ses caractéristiques, notamment la teneur en matière sèche (3,5 ou 7,0%) et la teneur en azote ammoniacal (N-NH_4^+).

Ces pertes par volatilisation sont comptabilisées au cours des 12 heures suivant l’épandage du lisier. Des simulations réalisées avec le modèle ALFAM2 montrent que, lorsque le lisier n’est pas incorporé, entre 31 et 76% des pertes ammoniacales cumulatives sur 72 heures surviennent durant cette période critique, tandis que cette proportion atteint entre 41 et 98% lorsque l’incorporation est effectuée immédiatement après l’épandage. Ces pertes à court terme sont particulièrement accentuées sous conditions chaudes et venteuses, ainsi qu’en présence d’une teneur élevée en matière sèche du lisier. Il est également important de souligner que les pertes par volatilisation deviennent généralement très faibles au-delà de trois jours après l’épandage du lisier.

Afin d’illustrer graphiquement le comportement des émissions cumulées à 12 et 72 heures après l’application, les Figure 9 et Figure 10 sont présentées. La Figure 9 montre une simulation réalisée à l’aide du modèle ALFAM2 (format Excel) pour des durées d’émission de 12 et 72 heures, sous des conditions identiques : lisier de porc à 3,5 % de matière sèche, température de 30 °C, vitesse du vent de 10 km h⁻¹, application par aspersion basse (broadcast) et absence d’incorporation. Dans ce premier scénario, environ 76 % des pertes totales d’azote surviennent au cours des 12 premières heures par rapport aux 72 heures.

La Figure 10, réalisée sous des conditions identiques à celles de la Figure 9, illustre l’effet de l’incorporation immédiate (temps d’incorporation = 0 h). Dans ce cas, environ 45 % des pertes se produisent durant les 12 premières heures relativement aux 72 heures. Ce résultat s’explique par la réduction instantanée des émissions liée à l’incorporation, comparativement à l’application par aspersion, tandis que les pertes restantes se manifestent plus progressivement dans le temps. De plus, dans les quatre scénarios simulés, la dynamique temporelle des émissions cumulées montre un pic au cours des cinq premières heures suivant l’application, après quoi les émissions ont tendance à se stabiliser. Ces résultats soulignent l’importance des premières heures suivant l’application pour la gestion et la réduction des pertes d’ammoniac.

Ainsi, le choix d’un horizon temporel de 12 heures vise à fournir un indicateur opérationnel pertinent, permettant d’appuyer la prise de décision du producteur en fonction des conditions spécifiques au jour de l’épandage.

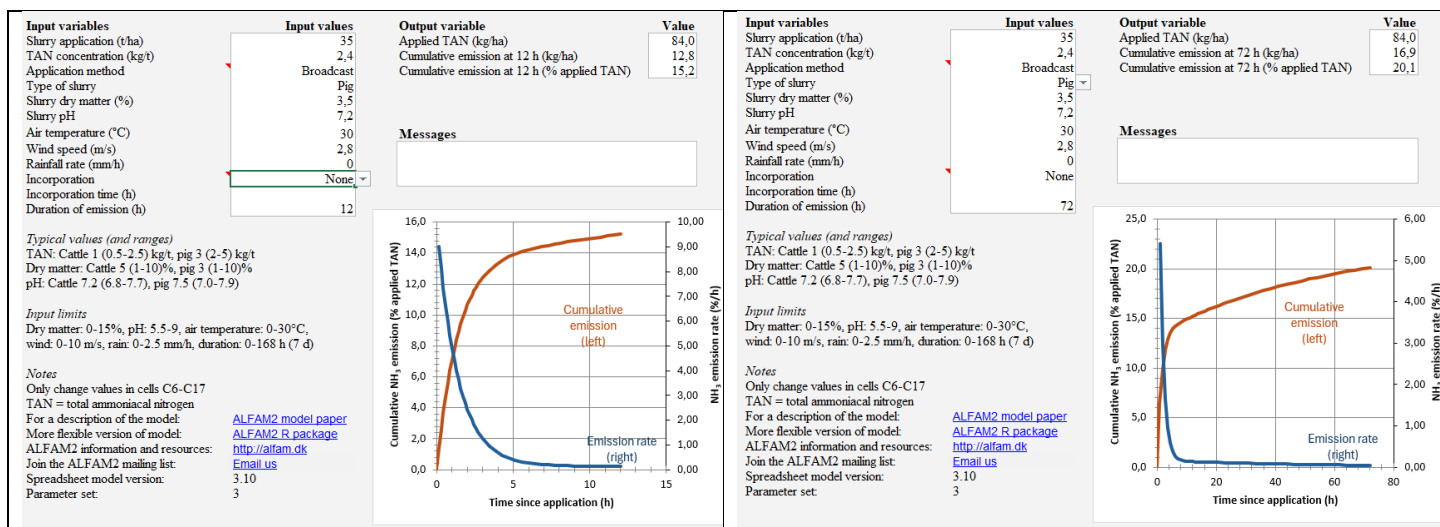


Figure 9. Simulation des émissions cumulées de NH₃ à 12 et 72 h après l'épandage de lisier de porc sans incorporation (modèle ALFAM2).

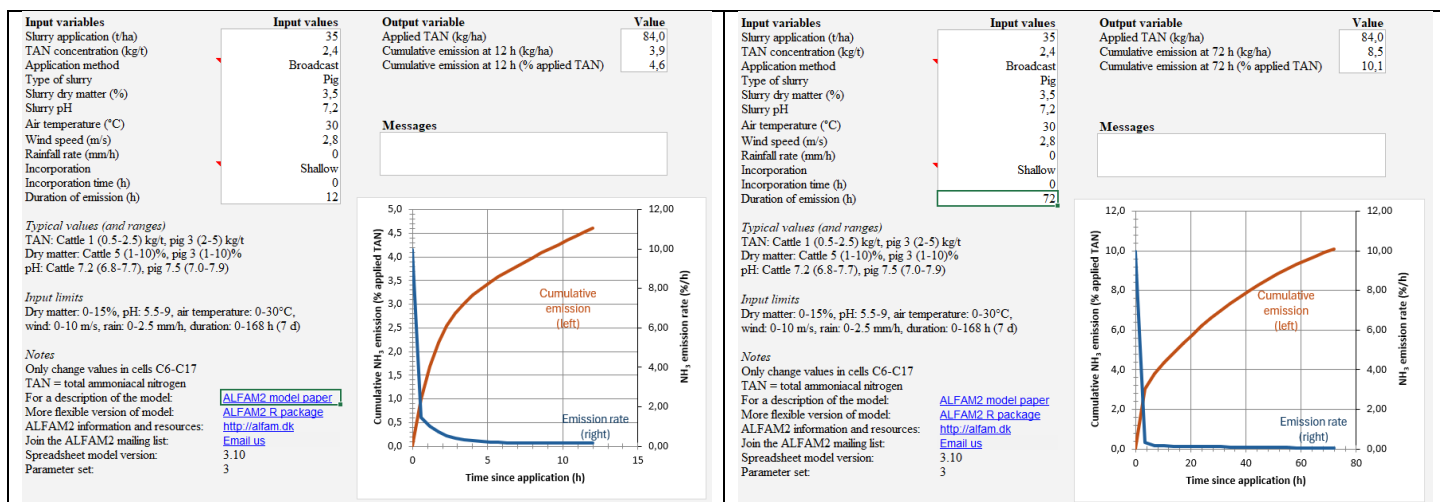


Figure 10. Effet de l'incorporation immédiate sur les émissions cumulées de NH₃ à 12 et 72 h après l'épandage de lisier de porc (modèle ALFAM2).

5.2 Description de l'OAD

L'OAD prend la forme d'un tableau interactif dans un fichier Excel, dans lequel l'utilisateur peut sélectionner, au moyen de menus déroulants, les conditions d'épandage, les propriétés du lisier et la dose de lisier appliquée à l'hectare. À partir de ces informations, l'outil fournit une estimation des émissions cumulatives de NH₃. En complément, la valeur économique de ces pertes est estimée en calculant la quantité et le coût des engrais minéraux azotés nécessaires pour compenser l'azote volatilisé, soit du nitrate d'ammonium calcique (CAN) ou de l'urée, selon les prix du marché (Annexe 3).

En outre, le fichier Excel contient deux onglets intitulés « Lisier de porc » et « Lisier de vache ». Ces onglets offrent une synthèse de l'effet combiné de la température, de la vitesse du vent et du délai d'incorporation sur les pertes d'azote sous forme d'ammoniac lors de l'épandage de lisier de vaches ou de porcs, en fonction de la teneur en matière sèche (3,5 % ou 7 %) et de la méthode d'application (aspersion basse ou pendillards). Chaque onglet présente les propriétés du lisier (N total et N-NH₄⁺) selon le Guide de référence en fertilisation (CRAAQ, 2011) ainsi que les pertes d'ammoniac calculées par le modèle ALFAM2 selon différents scénarios de température (10, 20, 30 °C), de vitesse du vent (5 à 25 km/h) et de délai d'incorporation (0, 3, 6 h ou absence d'incorporation). Les résultats incluent le pourcentage de N-NH₄⁺ volatilisé dans les 12 premières heures, l'émission cumulative de N-NH₃ (kg/t de lisier) et la quantité de fertilisant nécessaire pour compenser ces pertes, avec le coût associé (Annexe 4). De plus, les simulations ont été effectuées en supposant un pH de 7,2 pour les deux

types de lisier, valeur issue des analyses physico-chimiques au sein de l'IRDA et correspondant aux plages prévues par le modèle.

De manière générale, pour les deux types de lisier considérés, l'épandage avec pendillards entraîne des pertes par volatilisation plus faibles que l'épandage par aspersion basse, tandis qu'une teneur élevée en matière sèche tend à accentuer ces pertes. L'incorporation immédiate demeure l'un des moyens les plus efficaces pour les réduire de façon importante les émissions. Il est à noter que jusqu'à 98 % des pertes peuvent survenir dans les 12 premières heures suivant l'épandage. Une incorporation effectuée au-delà de ce délai occasionne ainsi des pertes comparables à une absence d'incorporation. Les conditions météorologiques influencent également les pertes d'azote par volatilisation; des températures élevées et des vitesses de vent importantes accentuent les émissions.

Il convient de souligner que les valeurs fournies par l'outil doivent être interprétées comme des estimations, et non comme des valeurs exactes. Elles s'appuient sur des données expérimentales et des résultats de simulation, et peuvent être influencées par certaines variables non prises en compte ou encore insuffisamment documentées. Néanmoins, ces estimations offrent un ordre de grandeur pertinent des bénéfices économiques potentiels associés aux différentes pratiques, constituant ainsi un appui utile à la prise de décision pour le producteur.

Afin de permettre une compréhension détaillée du fonctionnement de l'OAD, une fiche explicative a été élaborée. (Annexe 5)

6 Conclusion

Dans le contexte québécois, marqué par des changements climatiques, une augmentation des événements météorologiques extrêmes et des contraintes réglementaires spécifiques, la prise en compte des paramètres agrométéorologiques devient un élément incontournable de la planification des épandages. Toutefois, la littérature montre que ces paramètres ne peuvent être considérés isolément : ils interagissent étroitement avec les caractéristiques des sols, des fertilisants, des techniques d'application, ainsi qu'avec les contraintes logistiques et réglementaires auxquelles font face les producteurs. Ainsi, même si les techniques d'application telles que l'épandage en bandes, l'incorporation ou l'injection permettent de réduire les pertes par rapport à l'épandage en surface, l'effet des conditions météorologiques demeure déterminant, ce qui souligne l'importance de combiner les choix techniques avec une planification météorologique adéquate.

Cette revue de littérature met en évidence que le moment de l'épandage constitue un levier central pour limiter les pertes d'azote et les impacts environnementaux associés à la fertilisation. Les pertes surviennent majoritairement dans les heures suivant l'application, particulièrement sous forme de volatilisation ammoniacale, et sont fortement influencées par les conditions météorologiques immédiates. Des températures élevées, un fort rayonnement solaire, une vitesse de vent accrue et une faible humidité relative accentuent significativement les émissions de NH_3 , tandis que des conditions plus fraîches, humides ou une pluie modérée survenant peu après l'épandage permettent de réduire ces pertes. Les travaux recensés démontrent également que les épandages réalisés en soirée ou tôt le matin, lorsque le rayonnement et le déficit de pression de vapeur sont plus faibles, peuvent diminuer de façon notable la volatilisation de l'azote.

La littérature indique par ailleurs que les caractéristiques du fertilisant et du sol interagissent étroitement avec la météo pour moduler les pertes d'azote. Une teneur élevée en azote ammoniacal, une matière sèche ou un pH élevé augmentent le potentiel de volatilisation, tandis que les sols nus, compactés, saturés en eau ou de texture grossière présentent un risque accru de pertes par volatilisation, dénitrification ou lessivage selon les conditions rencontrées. Les émissions de protoxyde d'azote sont, quant à elles, principalement associées à des situations de sols anaérobies, fréquemment observées lors des périodes de gel-dégel, de fonte des neiges ou à la suite de précipitations abondantes, le dégel printanier étant généralement identifié comme une période critique.

Les pertes de phosphore sont surtout liées aux événements de ruissellement et d'érosion, en particulier lorsque des pluies surviennent peu de temps après l'épandage sur des sols nus ou en pente. Un délai suffisant entre l'application et un

événement pluvieux permet de réduire significativement ces pertes, bien que cette logique diffère de celle observée pour la volatilisation de l'azote, pour laquelle une pluie modérée peut s'avérer bénéfique.

En conclusion, l'intégration de données agrométéorologiques fiables et accessibles dans des outils d'aide à la décision représente une avenue prometteuse pour améliorer l'efficacité de la fertilisation, réduire les pertes d'azote et atténuer les impacts environnementaux de l'agriculture. Le développement d'un tel outil, arrimé aux réalités du terrain et soutenu par les connaissances scientifiques actuelles, constitue une étape clé pour accompagner les producteurs dans l'adaptation de leurs pratiques aux défis climatiques et environnementaux actuels et futurs. En surcroît, l'outil d'aide à la décision intègre un volet économique permettant de chiffrer la valeur monétaire des pertes potentielles ou des économies à réaliser.

En guise de recommandation, il serait souhaitable que davantage d'essais de quantification des pertes d'azote ammoniacal en conditions météorologiques extrêmes (forts vents, canicules, pluies diluviennes) soit réalisés en raison de l'augmentation de l'occurrence de ces événements provoquée par les changements climatiques.

L'ajout de l'outil d'aide à la décision à une source d'information météorologique déjà existante pour les producteurs tels qu'Agrométéo ou Météomédia permettrait de favoriser la prise en compte des facteurs météorologiques dans la décision du bon moment pour épandre.

7 Références

1. Alewell, C., Ringeval, B., Ballabio, C., Robinson, D. A., Panagos, P., et Borrelli, P. (2020). Global phosphorus shortage will be aggravated by soil erosion. *Nature communications*, 11(1), 4546.
2. Beef Cattle Research Concil. (2023). [En ligne] <https://www.beefresearch.ca/topics/manure-nutrient-management/> (page consultée le 27 septembre 2024).
3. Brassard, P., Mila Saavedra, L., Godbout, S., Duchaine, C., Turgeon, N., Wu, M., Baghdadi, M., Leclerc, S., Miralvand, A.Z. et Trivino, A.M. (2024). Émissions de bio-contaminants dans l'air lors des opérations d'épandage du lisier de porc : Évaluation et mitigation des risques pour la biosécurité des élevages en production porcine. Rapport final. IRDA et partenaires. 39 pages.
4. Brouquisse, R. et Puppo, A. (2019). Des plantes qui vivent de l'air du temps, Encyclopédie de l'Environnement. [En ligne] <https://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/plantes-air-du-temps/> (page consulté le 19 novembre 2024).
5. CDAQ, 2021. Plan d'adaptation de l'agriculture de la Capitale-Nationale et de la Côte-Nord aux changements climatiques. Projet Agriculmat. [En ligne] [Agriculmat Plan-adaptation Capitale-Nationale-Cote-Nord.pdf](#) (page consultée le 9 octobre 2024).
6. Chambers, B. J., Garwood, T. W. D., et Unwin, R. J. (2000). Controlling soil water erosion and phosphorus losses from arable land in England and Wales. *Journal of Environmental Quality*, 29(1), 145-150.
7. Clark, K., Chantigny, M. H., Angers, D. A., Rochette, P., et Parent, L. É. (2009). Nitrogen transformations in cold and frozen agricultural soils following organic amendments. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(2), 348-356.
8. Côté, D., Giroux, M., Ndayegamiye, A. et P. Guertin, S. (2002). Période d'épandage des engrais de ferme et risque environnemental. IRDA. [En ligne] <https://archives.bape.gouv.qc.ca/sections/mandats/prod-porcine/documents/Fuli48.PDF> (page consultée le 21 novembre 2024).
9. CRAAQ. (2011). Guide de référence en fertilisation. 2^e édition. 479 pages.
10. Elrashidi, M.A., Alva, A.K., Huang, Y.F., Calvert, D.V., Obreza, T.A. et He, Z.L. (2001). Accumulation and downward transport of phosphorus in Florida soils and relationship to water quality. *Commun.Soil.Sci.Plant,Anal*, 32(19&20), 3099-3119.
11. ENS. Reduce Nitrogen Loss. [En ligne] <https://smartenitrogen.com/reduce-nitrogen-loss/> (page consultée le 27 septembre 2024).
12. Environnement et Changement climatique Canada (ECCC). 2025. *Rapport d'inventaire national 1990–2023 : Sources et puits de gaz à effet de serre au Canada*. Disponible en ligne à : canada.ca/inventaire-ges.
13. Fédération d'agriculture biologique du Québec (FABQ). (2005). La fertilisation organique des cultures. [En ligne] [Brochure fertilisation15nov.pdf \(agrireseau.net\)](#) (page consultée le 11 octobre 2024).
14. Flesch, T. K., Wilson, J. D., Harper, L. A., Crenna, B. P., et Sharpe, R. R. (2004). Deducing ground-to-air emissions from observed trace gas concentrations: A field trial. *Journal of Applied Meteorology*, 43(3), 487-502.
15. Gamache, M.-M. (2014). Fonctionnement biologique des sols en période hivernale et gestion de l'azote en climat nordique. [En ligne] [cufe Gamache Marie-Michelle essai452.pdf \(usherbrooke.ca\)](#) (page consultée le 11 octobre 2024).

16. Girard, M., Gasser, M.O., Lévesque, A. et Tremblay, M.-E. (2017). Impact de la date d'épandage du lisier de porc sur le rendement des cultures ainsi que sur la qualité du sol, de l'eau et de l'air. Rapport final. IRDA. 60 pages [En ligne] [girard-et-al-2017-impact de la date depandage du lisier de porc sur le rendement des cultures ainsi que la qualite du sol de le au et de lair.pdf](#) (page consultée le 5 novembre 2024).
17. Gordon, R., Jamieson, R., Rodd, V., Patterson, G., et Harz, T. (2001). Effects of surface manure application timing on ammonia volatilization. *Canadian Journal of Soil Science*, 81(4), 525-533.
18. Gouvernement du Québec. (2020). Agir pour une agriculture durable. Plan 2020-2030. [En ligne] [Agir, pour une agriculture durable | Plan 2020-2030](#) (page consultée le 21 novembre 2024).
19. Hafner, S.D., 2018. The ALFAM2 database on ammonia emission from field-applied manure_ Description and illustrative analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*.
20. Hafner, S.D., Pacholski, A., Bittman, S., Carozzi, M., Chantigny, M., Génarmont, S., Häni, C., Hansen, M.N., Huijsmans, J., Kupper, T., Misselbrook, T., Neftel, A., Nyord, T., Sommer, S.G., 2019. A flexible semi-empirical model for estimating ammonia volatilization from field-applied slurry. *Atmospheric Environment* 199, 474-484. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.034>
21. Hafner S, Haeni C, Fuss R, Dalby F (2025). *ALFAM2: Dynamic Model of Ammonia Emission from Field-Applied Manure*. [doi:10.32614/CRAN.package.ALFAM2](https://doi.org/10.32614/CRAN.package.ALFAM2), R package version 4.2.14, <https://CRAN.R-project.org/package=ALFAM2>.
22. Hanrahan, L. P., Jokela, W. E., et Knapp, J. R. (2009). Dairy diet phosphorus and rainfall timing effects on runoff phosphorus from land-applied manure. *Journal of environmental quality*, 38(1), 212-217.
23. Hart, M. R., Quin, B. F., et Nguyen, M. L. (2004). Phosphorus runoff from agricultural land and direct fertilizer effects: A review. *Journal of environmental quality*, 33(6), 1954-1972.
24. Huijsmans, J.F.M., J.M.G. Hol, et M.M.W.B. Hendriks. (2001). Effect of Application Technique, Manure Characteristics, Weather and Field Conditions on Ammonia Volatilization from Manure Applied to Grassland. *NJAS: Wageningen Journal of Life Sciences* 49, n° 4 (1 décembre 2001): 323-42. [En ligne] [https://doi.org/10.1016/S1573-5214\(01\)80021-X](https://doi.org/10.1016/S1573-5214(01)80021-X). (page consultée le 27 septembre 2024).
25. Huijsmans, J. F. M., Hol, J. M. G., et Vermeulen, G. D. (2003). Effect of application method, manure characteristics, weather and field conditions on ammonia volatilization from manure applied to arable land. *Atmospheric Environment*, 37(26), 3669-3680.
26. Institut de technologies agroalimentaire. (2007). Épandage de lisiers et de fumiers. 28 pages.
27. Kamp, J.N., Häni, C., Nyord, T., Feilberg, A., Sørensen, L.L., 2020. The Aerodynamic Gradient Method: Implications of Non-Simultaneous Measurements at Alternating Heights. *Atmosphere* 11, 1067. <https://doi.org/10.3390/atmos11101067>
28. Kamp, J.N., Hafner, S.D., Huijsmans, J., Van Boheemen, K., Götze, H., Pacholski, A., Pedersen, J., 2024. Comparison of two micrometeorological and three enclosure methods for measuring ammonia emission after slurry application in two field experiments. *Agricultural and Forest Meteorology* 354, 110077. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2024.110077>
29. Kleinman, P. J., Srinivasan, M. S., Dell, C. J., Schmidt, J. P., Sharpley, A. N., et Bryant, R. B. (2006). Role of rainfall intensity and hydrology in nutrient transport via surface runoff. *Journal of environmental quality*, 35(4), 1248-1259.

30. Laubach, J., Taghizadeh-Toosi, A., Sherlock, R. R., et Kelliher, F. M. (2012). Measuring and modelling ammonia emissions from a regular pattern of cattle urine patches. *Agricultural and Forest Meteorology*, 156, 1-17.
31. Leytem, A. B., Moore, A. D. et Dungan, R. S. (2019). Greenhouse gas emissions from an irrigated crop rotation utilizing dairy manure. *Soil Science Society of America Journal*, 83(1), 137-152.
32. Loubet, Benjamin. (2014). Modèle FIDES – Fiche de présentation. <https://basc.hub.inrae.fr/recherche/modeles/fides>
33. Menne, M. J., Williams Jr, C. N., et Palecki, M. A. (2010). On the reliability of the US surface temperature record. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D11).
34. MDDELCC. (2017). Guide de Référence du Règlement sur les Exploitations Agricoles.
35. Ministère de l’Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). (2025). GES 1990-2023 Inventaire Québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2023 et leur évolution depuis 1990. [En ligne] <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2023/inventaire-ges-1990-2023.pdf> (page consultée le 9 janvier 2026).
36. Mkhabela, M. S., Gordon, R., Smith, E., Madani, A., et Burton, D. (2008). Measurement of odour emissions using micrometeorological techniques following application of hog slurry to grass. *Can Biosyst Eng*, 50, 6-37.
37. Moal, J. F., Martinez, J., Guiziou, F., et Coste, C. M. (1995). Ammonia volatilization following surface-applied pig and cattle slurry in France. *The Journal of Agricultural Science*, 125(2), 245-252.
38. Morvan, T. et Genermont, S. (2004). Volatilisation ammoniacale au champ : Comprendre pour maîtriser. INRA. Perspectives agricoles. No 302. [En ligne] [302 VOLATIL](#) (page consultée le 19 novembre 2024).
39. Münch, S., Papke, N., Leue, M., Faust, M., Schepanski, K., Siller, P., Roesler, U., Nübel, U., Kabelitz, T., Amon, T. et Funk, R. (2022). Differences in the sediment composition of wind eroded sandy soils before and after fertilization with poultry manure. *Soil and Tillage Research*, 215, 105205.
40. Ordre des agronomes du Québec (OAQ). (2006). Épandage post récolte des engrais organiques et risques environnementaux reliés aux pertes d’azote. [En ligne] [Microsoft Word- Revue littérature final.doc \(agrireseau.net\)](#) (page consultée le 11 octobre 2024).
41. Ordre des agronomes du Québec (OAQ). (2018). Ligne directrice sur les épandages postrécoltes des déjections animales. [En ligne] https://www.oaq.qc.ca/wp-content/uploads/2018/10/Lignedirectrice_epandagepostrecolte_2018_12_15.pdf (page consultée le 9 octobre 2024).
42. Ouranos. (2016a). Températures. [En ligne] [Températures- Changements observés | Ouranos](#) (page consultée le 9 octobre 2024).
43. Ouranos. (2016b). Températures. [En ligne] [Précipitations- Changements observés | Ouranos](#) (page consultée le 9 octobre 2024).
44. O’Rourke, S. M., Foy, R. H., Watson, C. J., Gordon, A., Higgins, S., et Vadas, P. A. (2022). Effect of increasing the time between slurry application and first rainfall event on phosphorus concentrations in runoff. *Soil Use and Management*, 38(1), 611-621.

45. Pedersen, Johanna, Tavs Nyord, Anders Feilberg, et Rodrigo Labouriau. (2021). Analysis of the Effect of Air Temperature on Ammonia Emission from Band Application of Slurry. *Environmental Pollution* 282 (août 2021): 117055. [En ligne] <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117055>. (page consultée le 27 septembre 2024).
46. David E. Pelster, Arumugam Thiagarajan, Chang Liang, Martin H. Chantigny, Claudia Wagner-Riddle, Kate Congreves, Reynald Lemke, Aaron Glenn, Mario Tenuta, Guillermo Hernandez-Ramirez, Shabtai Bittman, Derek Hunt, Jennifer Owens, and Douglas MacDonald. 2023. Ratio of non-growing season to growing season N₂O emissions in Canadian croplands: an update to national inventory methodology. *Canadian Journal of Soil Science*. 103(2): 344-352. <https://doi.org/10.1139/cjss-2022-0101>
47. Portejoie, S., Martinez, J. et Landmann, G. (2020). L'ammoniac d'origine agricole : impacts sur la santé humaine et animale et sur le milieu naturel. *Productions Animales*, 2002, 15 (3), pp.151-160. fhal0267948
48. Quinton, J. N., Catt, J. A., et Hess, T. M. (2001). The selective removal of phosphorus from soil: is event size important?. *Journal of Environmental Quality*, 30(2), 538-545.
49. Règlement sur les exploitations agricoles, Q-2, r. 26.
50. Riddle, M., Bergström, L., Schmieder, F., Kirchmann, H., Condron, L., et Aronsson, H. (2018). Phosphorus leaching from an organic and a mineral arable soil in a rainfall simulation study. *Journal of environmental quality*, 47(3), 487-495.
51. Risk, N., Snider, D., et Wagner-Riddle, C. (2013). Mechanisms leading to enhanced soil nitrous oxide fluxes induced by freeze–thaw cycles. *Canadian Journal of Soil Science*, 93(4), 401-414.
52. Rochette, P. (2008). Gestion des engrais minéraux et organique : Volatilisation de l'ammoniac. Colloque en agroenvironnement 2008. [En ligne] [Gestion des engrais minéraux et organiques : volatilisation de l'ammoniac Agri-Réseau | Documents \(agrireseau.net\)](https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/D%C3%A9pliantGES6p.pdf) (page consultée le 21 octobre 2024).
53. Rochette, P., Chantigny, M., Angers, D. et Vanasse, A. (2013). Gestion de l'azote des fumiers : comment réduire les pertes? Agriculture et Agroalimentaire Canada, Sainte-Foy – PAGES. [En ligne] <https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/D%C3%A9pliantGES6p.pdf> (page consultée le 19 novembre 2024).
54. Scotto di Perta, E., Fiorentino, N., Carozzi, M., Cervelli, E. et Pindozi, S. (2020). A review of chamber and micrometeorological methods to quantify NH₃ emissions from fertilisers field application. *International Journal of Agronomy*, 2020, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2020/8909784>.
55. Sharpe, R. R., Schomberg, H. H., Harper, L. A., Endale, D. M., Jenkins, M. B., et Franzluebbers, A. J. (2004). Ammonia volatilization from surface-applied poultry litter under conservation tillage management practices. *Journal of Environmental Quality*, 33(4), 1183-1188.
56. Shunlin Liang, Jindi Wang. (2020). Chapter 15- Estimate of vegetation production of terrestrial ecosystem. *Advanced Remote Sensing (Second Edition)*, 581-620. ISBN 9780128158265. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815826-5.00015-5>.
57. Siman, F. C., Andrade, F. V., Passos, R. R., Littig, M., & Machado, F. de O. (2021). Nitrogen Fertilizers and Volatilization of Ammonia, Carbonic Gas Emissions and Urease Activity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 53(4), 426–438. [En ligne] <https://doi.org/10.1080/00103624.2021.2017447> (page consultée le 27 septembre 2024).
58. Sørensen, H.T., Sommer, S.G., Hutchings, N.J., Huijsmans, J.F.M., Bussink, D.W., Nicholson, F., 2002. Ammonia volatilization from field-applied animal slurry—the ALFAM model. *Atmospheric Environment* 36, 3309–3319. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)00300-X](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)00300-X)

59. Sommer, S. G., et Olesen, J. E. (1991). *Effects of dry matter content and temperature on ammonia loss from surface-applied cattle slurry* (Vol. 20, No. 3, pp. 679-683). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America.
60. Sommer, S. G., Olesen, J. E., et Christensen, B. T. (1991). Effects of temperature, wind speed and air humidity on ammonia volatilization from surface applied cattle slurry. *The Journal of Agricultural Science*, 117(1), 91-100.
61. Sommer, S. G., & Olesen, J. E. (2000). Modelling ammonia volatilization from animal slurry applied with trail hoses to cereals. *Atmospheric Environment*, 34(15), 2361-2372.
62. Svensson, L. (1994). Ammonia volatilization following application of livestock manure to arable land. *Journal of agricultural engineering research*, 58(4), 241-260.
63. Tabbara, H. (2003). Phosphorus loss to runoff water twenty-four hours after application of liquid swine manure or fertilizer. *Journal of Environmental Quality*, 32(3), 1044-1052.
64. Tarek, M., Brissette, F. P., et Arsenault, R. (2020). Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(5), 2527-2544.
65. Thompson, R. B., Pain, B. F., et Rees, Y. J. (1990). Ammonia volatilization from cattle slurry following surface application to grassland: II. Influence of application rate, wind speed and applying slurry in narrow bands. *Plant and soil*, 125, 119-128.
66. Toreti, A., Belward, A., Perez-Dominguez, I., Naumann, G., Luterbacher, J., Cronie, O., Seguíni, L., Manfron, G., Lopez-Lozano, R., Baruth, B. et van Den Berg, M. (2019). The exceptional 2018 European water seesaw calls for action on adaptation. *Earth's Future*, 7(6), pp.652-663.
67. Unifa. (2024). Le cycle du phosphore (P). [En ligne] [Le cycle du phosphore \(P\)](#) (page consultée le 1er octobre 2024).
68. Weaver, D. M., et Ritchie, G. S. P. (1994). Phosphorus leaching in soils amended with piggery effluent or lime residues from effluent treatment. *Environmental Pollution*, 84(3), 227-235.
69. Wertz, S., Goyer, C., Zebarth, B. J., Burton, D. L., Tatti, E., Chantigny, M. H., et Filion, M. (2013). Effects of temperatures near the freezing point on N₂O emissions, denitrification and on the abundance and structure of nitrifying and denitrifying soil communities. *FEMS microbiology ecology*, 83(1), 242-254.
70. Wilson, J. D., Thurtell, G. W., Kidd, G. E., et Beauchamp, E. G. (1982). Estimation of the rate of gaseous mass transfer from a surface source plot to the atmosphere. *Atmospheric Environment* (1967), 16(8), 1861–1867. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(82\)90374-2](https://doi.org/10.1016/0004-6981(82)90374-2)
71. Xue, Q. Y., Dai, P. B., Sun, D. S., Sun, C. L., Qi, L. Y., Ostermann, A., He, Y. et Lin, X. Y. (2013). Effects of rainfall and manure application on phosphorus leaching in field lysimeters during fallow season. *Journal of Soils and Sediments*, 13, 1527-1537.
72. Yang, W., Zhu, A., Zhang, J., Zhang, X., et Che, W. (2016). Assessing the backward Lagrangian stochastic model for determining ammonia emissions using a synthetic source. *Agricultural and Forest Meteorology*, 216, 13-19.

ANNEXE 1

Questions interviews longs – agronomes

Projet PALCCB : Questionnaire pour les agronomes

Durée prévue : 60 minutes

Objectif de l'entrevue : aborder les aspects de l'utilisation des informations météorologiques dans la planification d'épandage d'engrais organiques par les agronomes.

1. Utilisez-vous des informations météorologiques (ex : température, pluie, vent, moment de la journée, niveau d'humidité, intensité solaire, etc.) pour aider dans la planification des travaux d'épandage pour les producteurs agricoles? Pourriez-vous décrire comment chacune de ces informations influence la planification d'épandage?
2. Quelles fiches techniques utilisez-vous pour guider les producteurs dans leurs pratiques d'épandage? Est-ce que ces fiches font références à l'utilisation de conditions météorologiques ou climatiques?
3. L'article 31 du REA permet une certaine flexibilité quant à la période d'épandage (dépasser le 1er octobre). Rencontrez-vous des difficultés pour interpréter ce qui constitue un sol enneigé ou gelé?
4. Comment intégrez-vous les facteurs météorologiques dans vos calculs de fertilisation, notamment pour évaluer les pertes d'émissions d'azote?
5. Lors de la préparation des recommandations pour l'épandage d'octobre, comment évaluez-vous les risques de pertes d'éléments fertilisants? Les conditions météorologiques influencent-elles votre évaluation?
6. Lors de l'établissement des distances séparatrices pour l'épandage près des zones habitables ou urbaines, considérez-vous des éléments comme la direction du vent, la force du vent, la topographie et les brise-vents?
7. Les risques de volatilisation et les émissions de GES sont-ils pris en compte dans vos recommandations d'épandage?
8. Devez-vous faire de la gestion d'épandage durant des événements météorologiques problématiques? Si oui, que faites-vous pour gérer ces situations?

ANNEXE 2

Questionnaire sur l'épandage

À quel moment réalisez-vous vos chantiers d'épandage? (printemps, automne, entre les coupes)

Type de matières épandues? (Fumier, lisier, engrais minéraux, mrf)

Classez par ordre d'importance (+ au -) les critères considérés dans la décision du bon moment pour épandre. (Température °C, type de culture, portance du sol, précipitations, vent, disponibilité du forfaitaire, autre)

- 1.
- 2.
- 3.

Considérez-vous des facteurs météo? Le ou lesquels? Pourquoi?

Utilisez-vous des outils ou services météo pour décider du meilleur moment d'épandre les engrais (organiques et minéraux)? (station météo personnelle, appli météo) Si oui, le ou lesquels?

Selon vous, y a-t-il des pertes pouvant être reliées à vos pratiques d'épandage? Lesquelles? Par quoi sont-elles causées selon vous?

Quelle importance accordez-vous à chacune des pertes que vous avez nommées?

ANNEXE 3

Variables d'entrée	Valeurs d'entrée
Type de lisier	Vache
Matière sèche (%)	3,5
Méthode d'épandage	Aspersion basse
Incorporation	0h
Température (°C)	20
Vitesse du vent (km/h)	10
Connaissez-vous la teneur en azote ammoniacal (N-NH ₄ ⁺) de votre lisier?	Non
Valeur personnalisée de N-NH ₄ ⁺ saisie par l'utilisateur (kg/t)	
Valeur de référence azote ammoniacal (N-NH ₄ ⁺) (kg/t)	1,4
Dose d'application (t/ha)	40

Variables de sortie	Valeur
Azote ammoniacal (N-NH ₄ ⁺) appliqué (kg/ha)	56
Perte d'azote sous forme de NH ₃ après 12 h (% du N-NH ₄ ⁺ appliqué)	6,9%
Émission cumulative de N-NH ₃ après 12 h (kg/ha)	3,9

Fertilisant minéral	Nitrate d'ammonium calcique (CAN)
Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/ha)	14,31
Valeur monétaire de fertilisant minéral pour compenser l'azote perdu (\$/ha)	14,48

ANNEXE 4

LISIERS DE VACHE			<table><tr><th>Prix 2025</th><th>Formule</th><th>\$/t</th><th>\$/kg</th></tr><tr><td>Nitrate d'ammonium calcique (CAN)</td><td>27-0-0</td><td>1012</td><td>1,012</td></tr><tr><td>Urée</td><td>46-0-0</td><td>1102</td><td>1,102</td></tr></table>				Prix 2025	Formule	\$/t	\$/kg	Nitrate d'ammonium calcique (CAN)	27-0-0	1012	1,012	Urée	46-0-0	1102	1,102		
Prix 2025	Formule		\$/t	\$/kg																
Nitrate d'ammonium calcique (CAN)	27-0-0		1012	1,012																
Urée	46-0-0		1102	1,102																
M.S (%)	3,5																			
N total (kg/t)	2,6																			
Azote ammoniacal total ou N-NH ₄ ⁺ (kg/t)	1,4																			
Aspersion basse		Pourcentage d'azote ammoniacal (% N-NH ₄ ⁺) appliqué qui est émis sous forme d'ammoniac (N-NH ₃) lors des 12 heures suivant l'épandage	Émissions cumulatives de N-NH ₃ (kg/t de lisier épandu)			Nitrate d'ammonium calcique (CAN)												Urée		
									Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épandu)			\$/t de lisier épandu			Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épandu)			\$/t de lisier épandu		
Vitesse du vent (km/h)		5																		
Délai avant incorporation	Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	
0h		4,8	6,1	7,1	0,07	0,09	0,10	0,25	0,32	0,37	0,25	0,32	0,37	0,15	0,19	0,22	0,16	0,20	0,24	
3h		9,7	15,5	22,7	0,14	0,22	0,32	0,50	0,80	1,18	0,51	0,81	1,19	0,30	0,47	0,69	0,33	0,52	0,76	
6h		12,9	20	26,7	0,18	0,28	0,37	0,67	1,04	1,38	0,68	1,05	1,40	0,39	0,61	0,81	0,43	0,67	0,90	
12h		16,1	23,1	27,9	0,23	0,32	0,39	0,83	1,20	1,45	0,84	1,21	1,46	0,49	0,70	0,85	0,54	0,77	0,94	
Sans incorporation		16,1	23,1	27,9	0,23	0,32	0,39	0,83	1,20	1,45	0,84	1,21	1,46	0,49	0,70	0,85	0,54	0,77	0,94	
Vitesse du vent (km/h)		10																		
Délai avant incorporation	Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	
0h		5,7	6,9	7,4	0,1	0,1	0,1	0,30	0,36	0,38	0,30	0,36	0,39	0,17	0,21	0,23	0,19	0,23	0,25	
3h		13,5	20,4	27,2	0,2	0,3	0,4	0,70	1,06	1,41	0,71	1,07	1,43	0,41	0,62	0,83	0,45	0,68	0,91	
6h		17,6	24,8	29,4	0,2	0,3	0,4	0,91	1,29	1,52	0,92	1,30	1,54	0,54	0,75	0,89	0,59	0,83	0,99	
12h		21	26,7	29,7	0,3	0,4	0,4	1,09	1,38	1,54	1,10	1,40	1,56	0,64	0,81	0,90	0,70	0,90	1,00	
Sans incorporation		21	26,7	29,7	0,3	0,4	0,4	1,09	1,38	1,54	1,10	1,40	1,56	0,64	0,81	0,90	0,70	0,90	1,00	
Vitesse du vent (km/h)		15																		
Délai avant incorporation	Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	
0h		6,4	7,2	7,6	0,1	0,1	0,1	0,33	0,37	0,39	0,34	0,38	0,40	0,19	0,22	0,23	0,21	0,24	0,25	
3h		16,9	24,1	29,6	0,2	0,3	0,4	0,88	1,25	1,53	0,89	1,26	1,55	0,51	0,73	0,90	0,57	0,81	0,99	
6h		24,5	27,6	30,5	0,3	0,4	0,4	1,27	1,43	1,58	1,29	1,45	1,60	0,75	0,84	0,93	0,82	0,93	1,02	
12h		24,3	28,5	30,5	0,3	0,4	0,4	1,26	1,48	1,58	1,28	1,50	1,60	0,74	0,87	0,93	0,82	0,96	1,02	
Sans incorporation		24,3	28,5	30,5	0,3	0,4	0,4	1,26	1,48	1,58	1,28	1,50	1,60	0,74	0,87	0,93	0,82	0,96	1,02	
Vitesse du vent (km/h)		25																		
Délai avant incorporation	Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	
0h		7,1	7,5	7,8	0,1	0,1	0,1	0,37	0,39	0,40	0,37	0,39	0,41	0,22	0,23	0,24	0,24	0,25	0,26	
3h		22,7	28,8	31,3	0,3	0,4	0,4	1,18	1,49	1,62	1,19	1,51	1,64	0,69	0,88	0,95	0,76	0,97	1,05	
6h		26,7	30,1	31,4	0,4	0,4	0,4	1,38	1,56	1,63	1,40	1,58	1,65	0,81	0,92	0,96	0,90	1,01	1,05	
12h		27,9	30,2	31,4	0,4	0,4	0,4	1,45	1,57	1,63	1,46	1,58	1,65	0,85	0,92	0,96	0,94	1,01	1,05	
Sans incorporation		27,9	30,2	31,4	0,4	0,4	0,4	1,45	1,57	1,63	1,46	1,58	1,65	0,85	0,92	0,96	0,94	1,01	1,05	

LISIÈRE DE VACHE														<table><tr><th>Prix 2025</th><th>Formule</th><th>\$/t</th><th>\$/kg</th></tr><tr><td>Nitrate d'ammonium calcique (CAN)</td><td>27-0-0</td><td>1012</td><td>1,012</td></tr><tr><td>Urée</td><td>46-0-0</td><td>1102</td><td>1,102</td></tr></table>				Prix 2025	Formule	\$/t	\$/kg	Nitrate d'ammonium calcique (CAN)	27-0-0	1012	1,012	Urée	46-0-0	1102	1,102
Prix 2025	Formule	\$/t	\$/kg																										
Nitrate d'ammonium calcique (CAN)	27-0-0	1012	1,012																										
Urée	46-0-0	1102	1,102																										
M.S (%)	3,5																												
N total (kg/t)	2,6																												
Azote ammoniacal total ou N-NH ₄ ⁺ (kg/t)	1,4																												
Pendillards		Pourcentage d'azote ammoniacal (% N-NH ₄ ⁺) appliqué qui est émis sous forme d'ammoniac (N-NH ₃) lors des 12 heures suivant l'épandage				Émissions cumulatives de N-NH ₃ (kg/t de lisier épandu)				Nitrate d'ammonium calcique (CAN)								Urée											
										Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épandu)				\$/t de lisier épandu				Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épandu)				\$/t de lisier épandu							
Vitesse du vent (km/h)		5																											
Délai avant incorporation		Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30									
0h			2,7	3,4	4,5	0,0	0,0	0,1	0,14	0,18	0,23	0,14	0,18	0,24	0,08	0,10	0,14	0,09	0,11	0,15									
3h			3,6	5,4	8,7	0,1	0,1	0,1	0,19	0,28	0,45	0,19	0,28	0,46	0,11	0,16	0,26	0,12	0,18	0,29									
6h			4,3	6,9	11,5	0,1	0,1	0,2	0,22	0,36	0,60	0,23	0,36	0,60	0,13	0,21	0,35	0,14	0,23	0,38									
12h			5,3	8,8	14,6	0,1	0,1	0,2	0,27	0,46	0,76	0,28	0,46	0,77	0,16	0,27	0,44	0,18	0,30	0,49									
Sans incorporation			5,3	8,8	14,6	0,1	0,1	0,2	0,27	0,46	0,76	0,28	0,46	0,77	0,16	0,27	0,44	0,18	0,30	0,49									
Vitesse du vent (km/h)		10																											
Délai avant incorporation		Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30									
0h			3,1	4,1	5,4	0,0	0,1	0,1	0,16	0,21	0,28	0,16	0,22	0,28	0,09	0,12	0,16	0,10	0,14	0,18									
3h			4,7	7,5	12,2	0,1	0,1	0,2	0,24	0,39	0,63	0,25	0,39	0,64	0,14	0,23	0,37	0,16	0,25	0,41									
6h			5,9	9,8	16	0,1	0,1	0,2	0,31	0,51	0,83	0,31	0,51	0,84	0,18	0,30	0,49	0,20	0,33	0,54									
12h			7,5	12,5	19,4	0,1	0,2	0,3	0,39	0,65	1,01	0,39	0,66	1,02	0,23	0,38	0,59	0,25	0,42	0,66									
Sans incorporation			7,5	12,5	19,4	0,1	0,2	0,3	0,39	0,65	1,01	0,39	0,66	1,02	0,23	0,38	0,59	0,25	0,42	0,66									
Vitesse du vent (km/h)		15																											
Délai avant incorporation		Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30									
0h			3,6	4,8	6,1	0,1	0,1	0,1	0,19	0,25	0,32	0,19	0,25	0,32	0,11	0,15	0,19	0,12	0,16	0,20									
3h			5,9	9,6	15,4	0,1	0,1	0,2	0,31	0,50	0,80	0,31	0,50	0,81	0,18	0,29	0,47	0,20	0,32	0,50									
6h			7,7	12,8	19,9	0,1	0,2	0,3	0,40	0,66	1,03	0,40	0,67	1,04	0,23	0,39	0,61	0,26	0,43	0,67									
12h			9,8	16	23	0,1	0,2	0,3	0,51	0,83	1,19	0,51	0,84	1,21	0,30	0,49	0,70	0,33	0,54	0,77									
Sans incorporation			9,8	16	23	0,1	0,2	0,3	0,51	0,83	1,19	0,51	0,84	1,21	0,30	0,49	0,70	0,33	0,54	0,77									
Vitesse du vent (km/h)		25																											
Délai avant incorporation		Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30									
0h			4,5	5,9	6,9	0,1	0,1	0,1	0,23	0,31	0,36	0,24	0,31	0,36	0,14	0,18	0,21	0,15	0,20	0,23									
3h			8,7	14,1	21,2	0,1	0,2	0,3	0,45	0,73	1,10	0,46	0,74	1,11	0,26	0,43	0,65	0,29	0,47	0,71									
6h			11,6	18,4	25,4	0,2	0,3	0,4	0,60	0,95	1,32	0,61	0,97	1,33	0,35	0,56	0,77	0,39	0,62	0,85									
12h			14,6	21,7	27,1	0,2	0,3	0,4	0,76	1,13	1,41	0,77	1,14	1,42	0,44	0,66	0,82	0,49	0,73	0,91									
Sans incorporation			14,6	21,7	27,1	0,2	0,3	0,4	0,76	1,13	1,41	0,77	1,14	1,42	0,44	0,66	0,82	0,49	0,73	0,91									

LISIÈRE DE VACHE																																					
M.S (%)			7																																		
N total (kg/t)			2,8																																		
Azote ammoniacal total ou N-NH ₄ ⁺ (kg/t)			1,4																																		
Aspersion basse		Pourcentage d'azote ammoniacal (% N-NH ₄ ⁺) appliqué qui est émis sous forme d'ammoniac (N-NH ₃) lors des 12 heures suivant l'épandage						Émissions cumulatives de N-NH ₃ (kg/t de lisier épandu)						Nitrates d'ammonium calcique (CAN)						Urée																	
														Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épandu)						\$/t de lisier épandu						Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épandu)						\$/t de lisier épandu					
Vitesse du vent (km/h)		5 km/h																																			
Délai avant incorporation		Température																																			
0h		10		20		30		10		20		30		10		20		30		10		20		30		10		20		30							
		7,3		10,5		13,1		0,1		0,1		0,2		0,38		0,54		0,68		0,38		0,55		0,69		0,22		0,32		0,40		0,24		0,35		0,44	
3h		16,3		28,2		44,2		0,2		0,4		0,6		0,85		1,48		2,29		0,88		1,48		2,32		0,50		0,86		1,35		0,55		0,95		1,48	
6h		22,4		37,7		54,5		0,3		0,5		0,8		1,16		1,95		2,83		1,18		1,98		2,86		0,68		1,15		1,66		0,75		1,26		1,83	
12h		29,2		45,5		59,0		0,4		0,6		0,8		1,51		2,36		3,06		1,53		2,39		3,10		0,89		1,38		1,80		0,98		1,53		1,98	
Sans incorporation		29,2		45,5		59,0		0,4		0,6		0,8		1,51		2,36		3,06		1,53		2,39		3,10		0,89		1,38		1,80		0,98		1,53		1,98	
Vitesse du vent (km/h)		10 km/h																																			
Délai avant incorporation		Température																																			
0h		10		20		30		10		20		30		10		20		30		10		20		30		10		20		30							
		9,5		12,5		14,2		0,1		0,2		0,2		0,49		0,65		0,74		0,50		0,66		0,75		0,29		0,38		0,43		0,32		0,42		0,48	
3h		23,9		38,8		55,4		0,3		0,5		0,8		1,24		2,01		2,87		1,25		2,04		2,91		0,73		1,18		1,69		0,80		1,30		1,86	
6h		32,3		49,4		62,8		0,5		0,7		0,9		1,67		2,56		3,26		1,69		2,59		3,30		0,98		1,50		1,91		1,08		1,66		2,11	
12h		40,3		55,4		64,3		0,6		0,8		0,9		2,09		2,87		3,33		2,11		2,91		3,37		1,23		1,69		1,96		1,35		1,86		2,16	
Sans incorporation		40,3		55,4		64,3		0,6		0,8		0,9		2,09		2,87		3,33		2,11		2,91		3,37		1,23		1,69		1,96		1,35		1,86		2,16	
Vitesse du vent (km/h)		15 km/h																																			
Délai avant incorporation		Température																																			
0h		10		20		30		10		20		30		10		20		30		10		20		30		10		20		30							
		11,1		13,5		14,7		0,2		0,2		0,2		0,58		0,70		0,76		0,58		0,71		0,77		0,34		0,41		0,45		0,37		0,45		0,49	
3h		31,2		47,8		62,5		0,4		0,7		0,9		1,82		2,47		3,24		1,84		2,50		3,28		0,95		1,45		1,90		1,05		1,60		2,10	
6h		41,2		57,3		66,5		0,6		0,8		0,9		2,14		2,97		3,45		2,16		3,01		3,49		1,25		1,74		2,02		1,38		1,92		2,23	
12h		48,7		60,9		66,9		0,7		0,9		0,9		2,53		3,16		3,47		2,56		3,20		3,51		1,48		1,85		2,04		1,63		2,04		2,24	
Sans incorporation		48,7		60,9		66,9		0,7		0,9		0,9		2,53		3,16		3,47		2,56		3,20		3,51		1,48		1,85		2,04		1,63		2,04		2,24	
Vitesse du vent (km/h)		25 km/h																																			
Délai avant incorporation		Température																																			
0h		10		20		30		10		20		30		10		20		30		10		20		30		10		20		30							
		13,2		14,5		15,2		0,2		0,2		0,2		0,68		0,75		0,79		0,69		0,76		0,80		0,40		0,44		0,46		0,44		0,49		0,51	
3h		44,2		60,0		68,8		0,6		0,8		1,0		2,29		3,11		3,57		2,32		3,15		3,61		1,35		1,83		2,09		1,48		2,01		2,31	
6h		54,5		65,3		69,5		0,8		0,9		1,0		2,83		3,39		3,60		2,86		3,43		3,65		1,66		1,99		2,12		1,83		2,19		2,33	
12h		59,0		66,0		69,5		0,8		0,9		1,0		3,06		3,42		3,60		3,10		3,46		3,65		1,80		2,01		2,12		1,98		2,21		2,33	
Sans incorporation		59,0		66,0		69,5		0,8		0,9		1,0		3,06		3,42		3,60		3,10		3,46		3,65		1,80		2,01		2,12		1,98		2,21		2,33	

LISIERS DE VACHE														<table><tr><th>Prix 2025</th><th>Formule</th><th>\$/t</th><th>\$/kg</th></tr><tr><td>Nitrate d'ammonium calcique (CAN)</td><td>27-0-0</td><td>1012</td><td>1,012</td></tr><tr><td>Urée</td><td>46-0-0</td><td>1102</td><td>1,102</td></tr></table>				Prix 2025	Formule	\$/t	\$/kg	Nitrate d'ammonium calcique (CAN)	27-0-0	1012	1,012	Urée	46-0-0	1102	1,102
Prix 2025	Formule	\$/t	\$/kg																										
Nitrate d'ammonium calcique (CAN)	27-0-0	1012	1,012																										
Urée	46-0-0	1102	1,102																										
M.S (%)	7																												
N total (kg/t)	2,6																												
Azote ammoniacal total ou N-NH ₄ ⁺ (kg/t)	1,4																												
Pendillards		Pourcentage d'azote ammoniacal (% N-NH ₄ ⁺) appliqué qui est émis sous forme d'ammoniac (N-NH ₃) lors des 12 heures suivant l'épandage				Émissions cumulatives de N-NH ₃ (kg/t de lisier épandu)				Nitrate d'ammonium calcique (CAN)				Urée															
										Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épandu)				\$/t de lisier épandu				Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épandu)				\$/t de lisier épandu							
Vitesse du vent (km/h)		5 km/h				10 km/h				15 km/h				20 km/h				25 km/h				30 km/h							
Décal avant incorporation		Température				Température				Température				Température				Température				Température							
0h		10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30							
3h																													
6h																													
12h																													
Sans incorporation																													
Vitesse du vent (km/h)		10 km/h				15 km/h				20 km/h				25 km/h				30 km/h											
Décal avant incorporation		Température				Température				Température				Température				Température											
0h		10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30							
3h																													
6h																													
12h																													
Sans incorporation																													
Vitesse du vent (km/h)		15 km/h				20 km/h				25 km/h				30 km/h															
Décal avant incorporation		Température				Température				Température				Température															
0h		10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30							
3h																													
6h																													
12h																													
Sans incorporation																													
Vitesse du vent (km/h)		20 km/h				25 km/h				30 km/h																			
Décal avant incorporation		Température				Température				Température																			
0h		10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30							
3h																													
6h																													
12h																													
Sans incorporation																													

LISIERS DE PORC																		
M.S (%)	3,5	<table><tr><th>Prix 2025</th><th>Formule</th><th>\$/t</th><th>\$/kg</th></tr><tr><td>Nitrate d'ammonium calcique (CAN)</td><td>27-0-0</td><td>1012</td><td>1,012</td></tr><tr><td>Urée</td><td>46-0-0</td><td>1102</td><td>1,102</td></tr></table>				Prix 2025	Formule	\$/t	\$/kg	Nitrate d'ammonium calcique (CAN)	27-0-0	1012	1,012	Urée	46-0-0	1102	1,102	
Prix 2025	Formule	\$/t		\$/kg														
Nitrate d'ammonium calcique (CAN)	27-0-0	1012		1,012														
Urée	46-0-0	1102	1,102															
N total (kg/t)	3,5																	
Azote ammoniacal total ou N-NH ₄ ⁺ (kg/t)	2,4																	
Aspersion basse		Pourcentage d'azote ammoniacal (% N-NH ₄ ⁺) appliqué qui est émis sous forme d'ammoniac (N-NH ₃) lors des 12 heures suivant l'épandage		Émissions cumulatives de NH ₃ (kg/t_lisier_épanché)		Nitrate d'ammonium calcique (CAN)				Urée								
						Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épanché)		\$/t de lisier épanché		Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épanché)		\$/t de lisier épanché						
Vitesse du vent (km/h)		5		10		15		20		25		30						
Délai avant incorporation	Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30					
0h		3,4	4	4,4	0,1	0,1	0,1	0,30	0,36	0,39	0,31	0,36	0,40					
3h		5,7	8,5	11,9	0,1	0,2	0,3	0,51	0,76	1,06	0,51	0,76	1,07					
6h		7,2	10,6	13,8	0,2	0,3	0,3	0,64	0,94	1,23	0,65	0,95	1,24					
12h		8,8	12,1	14,4	0,2	0,3	0,3	0,78	1,08	1,28	0,79	1,09	1,30					
Sans incorporation		8,8	12,1	14,4	0,2	0,3	0,3	0,78	1,08	1,28	0,79	1,09	1,30					
Vitesse du vent (km/h)		10		15		20		25		30		35						
Délai avant incorporation	Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30					
0h		3,8	4,3	4,8	0,1	0,1	0,1	0,34	0,38	0,41	0,34	0,39	0,41					
3h		7,5	10,8	14,4	0,2	0,3	0,3	0,67	0,96	1,28	0,67	0,97	1,30					
6h		9,5	12,9	15,1	0,2	0,3	0,4	0,84	1,15	1,34	0,85	1,16	1,36					
12h		11,1	13,8	15,2	0,3	0,3	0,4	0,99	1,23	1,35	1,00	1,24	1,37					
Sans incorporation		11,1	13,8	15,2	0,3	0,3	0,4	0,99	1,23	1,35	1,00	1,24	1,37					
Vitesse du vent (km/h)		15		20		25		30		35		40						
Délai avant incorporation	Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30					
0h		4,1	4,5	4,7	0,1	0,1	0,1	0,36	0,40	0,42	0,37	0,40	0,42					
3h		9,1	12,6	15,2	0,2	0,3	0,4	0,81	1,12	1,35	0,82	1,13	1,37					
6h		11,3	14,3	15,6	0,3	0,3	0,4	1,00	1,27	1,39	1,02	1,29	1,40					
12h		12,7	14,7	15,6	0,3	0,4	0,4	1,13	1,31	1,39	1,14	1,32	1,40					
Sans incorporation		12,7	14,7	15,6	0,3	0,4	0,4	1,13	1,31	1,39	1,14	1,32	1,40					
Vitesse du vent (km/h)		20		25		30		35		40		45						
Délai avant incorporation	Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30					
0h		4,4	4,7	4,8	0,1	0,1	0,1	0,39	0,42	0,43	0,40	0,42	0,43					
3h		11,9	14,8	16	0,3	0,4	0,4	1,06	1,32	1,42	1,07	1,33	1,44					
6h		13,8	15,4	16	0,3	0,4	0,4	1,23	1,37	1,42	1,24	1,39	1,44					
12h		14,4	15,5	16	0,3	0,4	0,4	1,28	1,38	1,42	1,30	1,39	1,44					
Sans incorporation		14,4	15,5	16	0,3	0,4	0,4	1,28	1,38	1,42	1,30	1,39	1,44					

LISIERS DE PORC																													
M.S (%)		3,5																											
N total (kg/t)		3,5																											
Azote ammoniacal total ou N-NH ₄ ⁺ (kg/t)		2,4																											
Pendillards			Pourcentage d'azote ammoniacal (% N-NH ₄ ⁺) appliqué qui est émis sous forme d'ammoniac (N-NH ₃) lors des 12 heures suivant l'épandage						Émissions cumulatives de NH ₃ (kg/t_lisier_épanché)			Nitrates d'ammonium calcique (CAN)									Urée								
									Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épanché)			\$/t de lisier épanché			Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épanché)						\$/t de lisier épanché								
Vitesse du vent (km/h)			5																										
Délai avant Incorporation		Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30									
0h			2,3	2,7	3,2	0,1	0,1	0,1	0,20	0,24	0,28	0,21	0,24	0,29	0,12	0,14	0,17	0,13	0,16	0,18									
3h			2,8	3,6	5,2	0,1	0,1	0,1	0,25	0,32	0,46	0,25	0,32	0,47	0,15	0,19	0,27	0,16	0,21	0,30									
6h			3,1	4,4	6,6	0,1	0,1	0,2	0,28	0,39	0,59	0,28	0,40	0,59	0,16	0,23	0,34	0,18	0,25	0,38									
12h			3,6	5,3	8	0,1	0,1	0,2	0,32	0,47	0,71	0,32	0,48	0,72	0,19	0,28	0,42	0,21	0,30	0,46									
Sans Incorporation			3,6	5,3	8	0,1	0,1	0,2	0,32	0,47	0,71	0,32	0,48	0,72	0,19	0,28	0,42	0,21	0,30	0,46									
Vitesse du vent (km/h)			10																										
Délai avant Incorporation		Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30									
0h			2,5	3	3,7	0,1	0,1	0,1	0,22	0,27	0,33	0,22	0,27	0,33	0,13	0,16	0,19	0,14	0,17	0,21									
3h			3,3	4,6	6,9	0,1	0,1	0,2	0,29	0,41	0,61	0,30	0,41	0,62	0,17	0,24	0,36	0,19	0,26	0,40									
6h			3,9	5,7	8,7	0,1	0,1	0,2	0,35	0,51	0,77	0,35	0,51	0,78	0,20	0,30	0,45	0,22	0,33	0,50									
12h			4,6	7	10,3	0,1	0,2	0,2	0,41	0,62	0,92	0,41	0,63	0,93	0,24	0,37	0,54	0,26	0,40	0,59									
Sans Incorporation			4,6	7	10,3	0,1	0,2	0,2	0,41	0,62	0,92	0,41	0,63	0,93	0,24	0,37	0,54	0,26	0,40	0,59									
Vitesse du vent (km/h)			15																										
Délai avant Incorporation		Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30									
0h			2,8	3,3	4	0,1	0,1	0,1	0,25	0,29	0,36	0,25	0,30	0,36	0,15	0,17	0,21	0,16	0,19	0,23									
3h			3,9	5,7	8,4	0,1	0,1	0,2	0,35	0,51	0,75	0,35	0,51	0,75	0,20	0,30	0,44	0,22	0,33	0,48									
6h			4,7	7,2	10,5	0,1	0,2	0,3	0,42	0,64	0,93	0,42	0,65	0,94	0,25	0,38	0,55	0,27	0,41	0,60									
12h			5,8	8,7	12	0,1	0,2	0,3	0,52	0,77	1,07	0,52	0,78	1,08	0,30	0,45	0,63	0,33	0,50	0,69									
Sans Incorporation			5,8	8,7	12	0,1	0,2	0,3	0,52	0,77	1,07	0,52	0,78	1,08	0,30	0,45	0,63	0,33	0,50	0,69									
Vitesse du vent (km/h)			25																										
Délai avant Incorporation		Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30									
0h			3,2	3,9	4,4	0,1	0,1	0,1	0,28	0,35	0,39	0,29	0,36	0,40	0,17	0,20	0,23	0,18	0,22	0,25									
3h			5,2	7,8	11,2	0,1	0,2	0,3	0,46	0,69	1,00	0,47	0,70	1,01	0,27	0,41	0,58	0,30	0,45	0,64									
6h			6,6	9,8	13,2	0,2	0,2	0,3	0,59	0,87	1,17	0,59	0,88	1,19	0,34	0,51	0,69	0,38	0,56	0,76									
12h			8	11,4	14	0,2	0,3	0,3	0,71	1,01	1,24	0,72	1,03	1,26	0,42	0,59	0,73	0,46	0,66	0,80									
Sans Incorporation			8	11,4	14	0,2	0,3	0,3	0,71	1,01	1,24	0,72	1,03	1,26	0,42	0,59	0,73	0,46	0,66	0,80									

LISIÈRE DE PORC														<table><tr><th>Prix 2025</th><th>Formule</th><th>\$/t</th><th>\$/kg</th></tr><tr><td>Nitrate d'ammonium calcique (CAN)</td><td>27-0-0</td><td>1012</td><td>1,012</td></tr><tr><td>Urée</td><td>46-0-0</td><td>1102</td><td>1,102</td></tr></table>				Prix 2025	Formule	\$/t	\$/kg	Nitrate d'ammonium calcique (CAN)	27-0-0	1012	1,012	Urée	46-0-0	1102	1,102																																					
Prix 2025	Formule	\$/t	\$/kg																																																															
Nitrate d'ammonium calcique (CAN)	27-0-0	1012	1,012																																																															
Urée	46-0-0	1102	1,102																																																															
M.S (%)	7																																																																	
N total (kg/t)	3,5																																																																	
Azote ammoniacal total ou N-NH ₄ ⁺ (kg/t)	2,4																																																																	
Aspersion basse		Pourcentage d'azote ammoniacal (% N-NH ₄ ⁺) appliqué qui est émis sous forme d'ammoniac (N-NH ₃) lors des 12 heures suivant l'épandage				Émissions cumulatives de NH ₃ (kg/t_lisier_épandu)				<table><tr><th colspan="6">Nitrate d'ammonium calcique (CAN)</th><th colspan="6">Urée</th></tr><tr><th colspan="3">Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épandu)</th><th colspan="3">\$/t de lisier épandu</th><th colspan="3">Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épandu)</th><th colspan="3">\$/t de lisier épandu</th></tr><tr><th>10</th><th>20</th><th>30</th><th>10</th><th>20</th><th>30</th><th>10</th><th>20</th><th>30</th><th>10</th><th>20</th><th>30</th><th>10</th><th>20</th><th>30</th><th>10</th><th>20</th><th>30</th><th>10</th><th>20</th><th>30</th></tr></table>												Nitrate d'ammonium calcique (CAN)						Urée						Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épandu)			\$/t de lisier épandu			Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épandu)			\$/t de lisier épandu			10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30
Nitrate d'ammonium calcique (CAN)						Urée																																																												
Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épandu)			\$/t de lisier épandu			Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épandu)			\$/t de lisier épandu																																																									
10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30																																														
Vitesse du vent (km/h)		5																																																																
Délai avant incorporation	Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30																																									
0h		5,7	7,9	9,7	0,1	0,2	0,2	0,51	0,70	0,86	0,51	0,71	0,87	0,30	0,41	0,51	0,33	0,45	0,56																																															
3h		11,9	20,2	31,2	0,3	0,5	0,7	1,06	1,80	2,77	1,07	1,82	2,81	0,82	1,05	1,63	0,88	1,16	1,79																																															
6h		16,1	26,7	38,4	0,4	0,6	0,9	1,43	2,37	3,41	1,46	2,40	3,45	0,84	1,39	2,00	0,93	1,54	2,21																																															
12h		20,9	32,2	41,5	0,5	0,8	1,0	1,86	2,86	3,69	1,88	2,90	3,73	1,09	1,68	2,17	1,20	1,85	2,39																																															
Sans incorporation		20,9	32,2	41,5	0,5	0,8	1,0	1,86	2,86	3,69	1,88	2,90	3,73	1,09	1,68	2,17	1,20	1,85	2,39																																															
Vitesse du vent (km/h)		10																																																																
Délai avant incorporation	Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30																																									
0h		7,2	9,3	10,5	0,2	0,2	0,3	0,64	0,83	0,93	0,65	0,84	0,94	0,38	0,49	0,55	0,41	0,53	0,60																																															
3h		17,2	27,5	39,0	0,4	0,7	0,9	1,53	2,44	3,47	1,55	2,47	3,51	0,90	1,43	2,03	0,99	1,58	2,24																																															
6h		23,0	34,9	44,1	0,6	0,8	1,1	2,04	3,10	3,92	2,07	3,14	3,97	1,20	1,82	2,30	1,32	2,01	2,54																																															
12h		28,5	39,0	45,2	0,7	0,9	1,1	2,53	3,47	4,02	2,56	3,51	4,07	1,49	2,03	2,36	1,64	2,24	2,60																																															
Sans incorporation		28,5	39,0	45,2	0,7	0,9	1,1	2,53	3,47	4,02	2,56	3,51	4,07	1,49	2,03	2,36	1,64	2,24	2,60																																															
Vitesse du vent (km/h)		15																																																																
Délai avant incorporation	Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30																																									
0h		8,4	10,0	10,8	0,2	0,2	0,3	0,75	0,89	0,96	0,78	0,90	0,97	0,44	0,52	0,56	0,48	0,57	0,62																																															
3h		22,2	33,6	43,9	0,5	0,8	1,1	1,97	2,99	3,90	2,00	3,02	3,95	1,16	1,75	2,29	1,28	1,93	2,52																																															
6h		29,2	40,4	46,7	0,7	1,0	1,1	2,60	3,59	4,15	2,63	3,63	4,20	1,52	2,11	2,44	1,68	2,32	2,69																																															
12h		34,4	42,8	47,0	0,8	1,0	1,1	3,06	3,80	4,18	3,09	3,85	4,23	1,79	2,23	2,45	1,98	2,46	2,70																																															
Sans incorporation		34,4	42,8	47,0	0,8	1,0	1,1	3,06	3,80	4,18	3,09	3,85	4,23	1,79	2,23	2,45	1,98	2,46	2,70																																															
Vitesse du vent (km/h)		25																																																																
Délai avant incorporation	Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30																																									
0h		9,7	10,7	11,2	0,2	0,3	0,3	0,86	0,95	1,00	0,87	0,96	1,01	0,51	0,56	0,58	0,56	0,62	0,64																																															
3h		31,3	42,2	48,3	0,8	1,0	1,2	2,78	3,75	4,29	2,82	3,80	4,34	1,63	2,20	2,52	1,80	2,43	2,78																																															
6h		38,4	45,9	48,8	0,9	1,1	1,2	3,41	4,08	4,34	3,45	4,13	4,39	2,00	2,39	2,55	2,21	2,64	2,81																																															
12h		41,5	46,4	48,8	1,0	1,1	1,2	3,69	4,12	4,34	3,73	4,17	4,39	2,17	2,42	2,55	2,39	2,67	2,81																																															
Sans incorporation		41,5	46,4	48,8	1,0	1,1	1,2	3,69	4,12	4,34	3,73	4,17	4,39	2,17	2,42	2,55	2,39	2,67	2,81																																															

LISIERS DE PORC																						
M.S (%)	7																					
N total (kg/t)	3,5																					
Azote ammoniacal total ou N-NH ₄ ⁺ (kg/t)	2,4																					
Pendillards		Pourcentage d'azote ammoniacal (% N-NH ₄ ⁺) appliqué qui est émis sous forme d'ammoniac (N-NH ₃) lors des 12 heures suivant l'épandage						Émissions cumulatives de NH ₃ (kg/t_lisier_épandu)			Nitrate d'ammonium calcique (CAN)						Urée					
								Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épandu)			\$/t de lisier épandu			Masse de fertilisant requise pour compenser l'azote perdu (kg/t de lisier épandu)			\$/t de lisier épandu					
Vitesse du vent (km/h)		5																				
Décal avant incorporation	Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30			
0h		2,8	3,7	5,3	0,1	0,1	0,1	0,25	0,33	0,47	0,25	0,33	0,48	0,15	0,19	0,28	0,16	0,21	0,30			
3h		3,9	6,2	10,6	0,1	0,1	0,3	0,35	0,55	0,94	0,35	0,56	0,95	0,20	0,32	0,55	0,22	0,36	0,61			
6h		4,8	8,1	14,3	0,1	0,2	0,3	0,43	0,72	1,27	0,43	0,73	1,29	0,25	0,42	0,75	0,28	0,47	0,82			
12h		6,0	10,6	18,6	0,1	0,3	0,4	0,53	0,94	1,65	0,54	0,95	1,67	0,31	0,55	0,97	0,34	0,61	1,07			
Sans incorporation		6,0	10,6	18,6	0,1	0,3	0,4	0,53	0,94	1,65	0,54	0,95	1,67	0,31	0,55	0,97	0,34	0,61	1,07			
Vitesse du vent (km/h)		10																				
Décal avant incorporation	Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30			
0h		3,4	4,7	6,7	0,1	0,1	0,2	0,30	0,42	0,60	0,31	0,42	0,60	0,18	0,25	0,35	0,20	0,27	0,39			
3h		5,3	8,9	15,3	0,1	0,2	0,4	0,47	0,79	1,36	0,48	0,80	1,38	0,28	0,46	0,80	0,30	0,51	0,88			
6h		6,8	11,9	20,6	0,2	0,3	0,5	0,60	1,06	1,83	0,61	1,07	1,85	0,35	0,62	1,07	0,39	0,68	1,18			
12h		8,8	15,7	26,0	0,2	0,4	0,6	0,78	1,40	2,31	0,79	1,41	2,34	0,46	0,82	1,36	0,51	0,90	1,49			
Sans incorporation		8,8	15,7	26,0	0,2	0,4	0,6	0,78	1,40	2,31	0,79	1,41	2,34	0,46	0,82	1,36	0,51	0,90	1,49			
Vitesse du vent (km/h)		15																				
Décal avant incorporation	Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30			
0h		4,0	5,7	7,9	0,1	0,1	0,2	0,36	0,51	0,70	0,36	0,51	0,71	0,21	0,30	0,41	0,23	0,33	0,45			
3h		6,9	11,8	20,0	0,2	0,3	0,5	0,61	1,05	1,78	0,62	1,06	1,80	0,36	0,62	1,04	0,40	0,68	1,15			
6h		9,1	16,0	26,5	0,2	0,4	0,6	0,81	1,42	2,36	0,82	1,44	2,38	0,47	0,83	1,38	0,52	0,92	1,52			
12h		11,9	20,7	32,0	0,3	0,5	0,8	1,06	1,84	2,84	1,07	1,86	2,88	0,62	1,08	1,67	0,68	1,19	1,84			
Sans incorporation		11,9	20,7	32,0	0,3	0,5	0,8	1,06	1,84	2,84	1,07	1,86	2,88	0,62	1,08	1,67	0,68	1,19	1,84			
Vitesse du vent (km/h)		25																				
Décal avant incorporation	Température	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30	10	20	30			
0h		5,3	7,4	9,4	0,1	0,2	0,2	0,47	0,66	0,84	0,48	0,67	0,85	0,28	0,39	0,49	0,30	0,43	0,54			
3h		10,6	18,1	28,7	0,3	0,4	0,7	0,94	1,61	2,55	0,95	1,63	2,58	0,55	0,94	1,50	0,61	1,04	1,65			
6h		14,3	24,2	36,0	0,3	0,6	0,9	1,27	2,15	3,20	1,29	2,18	3,24	0,75	1,26	1,88	0,82	1,39	2,07			
12h		18,7	29,7	39,9	0,4	0,7	1,0	1,66	2,64	3,55	1,68	2,67	3,59	0,98	1,55	2,08	1,08	1,71	2,29			
Sans incorporation		18,7	29,7	39,9	0,4	0,7	1,0	1,66	2,64	3,55	1,68	2,67	3,59	0,98	1,55	2,08	1,08	1,71	2,29			

ANNEXE 5

Lien vers la fiche téléchargeable