

## Volatilisation ammoniacale au champ

# Comprendre pour maîtriser

**Les pertes d'azote par volatilisation ammoniacale après épandage de produits organiques et de fertilisants de synthèse peuvent être très fortes et très variables. La réduction de ces pertes répond à des enjeux agronomiques, économiques et environnementaux croissants. Elle a motivé le renforcement des programmes de recherche depuis une dizaine d'années en France.**

**L**a volatilisation ammoniacale correspond à l'émission dans l'atmosphère d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) provenant principalement des effluents organiques et des fertilisants de synthèse. On estime que 97 % des émissions de  $\text{NH}_3$  proviennent de l'activité agricole en France, dont plus de 80 % sont dues à l'élevage. La maîtrise de la volatilisation ammoniacale au champ représente un enjeu agronomique non négligeable, car les pertes à l'épandage représentent 50 % environ des émissions liées à cette activité. Elles sont extrêmement variables : elles peuvent affecter entre 0 et 100 % de l'azote ammoniacal contenu dans le produit, selon la nature du produit, la nature du sol, les matériels d'épandage et les conditions climatiques. Ces missions ont aussi des conséquences environnementales : l'ammoniac, 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. De ce fait, dans le cadre de la Convention de Genève sur la "pollution atmosphérique transfrontalière à longue distance", les Etats européens se sont engagés à réduire de 17 % leurs émissions d'ici 2010, sur la base de celles de 1990 en signant en 1999 le protocole multi-effets multi-polluants de Göteborg.

### Les connaissances s'affinent

Ces enjeux ont motivé le renforcement de programmes de recherche conduits en France par l'Inra, le Cemagref et les Instituts de Développement Agricole, avec pour objectifs :

- d'affiner le calcul des facteurs d'émission nationaux et régionaux, afin d'améliorer les inventaires français, qui sont à la base de nos engagements dans les protocoles de réduction ;
- de proposer et évaluer des techniques et des stratégies de réduction des pertes au champ adaptées aux conditions de sol, de climat et aux techniques culturales pro-pres à chaque région ;
- de prendre en compte la volatilisation d'ammoniac dans l'ensemble du raisonnement intégré de la fertilisation azotée et du recyclage des produits organiques ; en effet, réduire la volatilisation ne doit pas conduire à des transferts de pollution entre espèces, se traduisant par exemple par une

augmentation des émissions de protoxyde d'azote, et entre milieux, entraînant par exemple une augmentation de la pollution nitrique des eaux.

Pour atteindre ces objectifs, les chercheurs quantifient les pertes d'ammoniac à l'aide de dispositifs de mesure présentés sur les *photos 1 et 2*, à des échelles spatiales variant de l'hectare pour les méthodes micrométéorologiques, au mètre carré pour les tunnels de volatilisation et à quelques dizaines

**➤ Réduire les missions de 17 % d'ici 2010 en Europe.**



**Les méthodes micrométéorologiques permettent de mesurer les missions à partir des profils de concentration en ammoniac et de vitesse de vent sur un mât placé au centre d'une zone fertilisée. Ces méthodes ne perturbent pas les conditions d'émission, et rendent compte des émissions réellement observées en condition agricole.**

T. Morvan  
morvan@rennes.inra.fr

S. Genermont  
sophie.Genermont@grignon.inra.fr

INRA  
E. Le Cadre  
Edith.Le.Cadre@grignon.inra.fr

Grande Paroisse SA

F. Thirion  
francois.thirion@CLERMONT.cemagref.fr

Cemagref

de centimètres carrés pour les cellules de ventilation.

La mise en œuvre de ces méthodes depuis une dizaine d'années en France a permis d'acquies de nombreuses références sur les émissions d'ammoniac dans des conditions et des milieux variés.

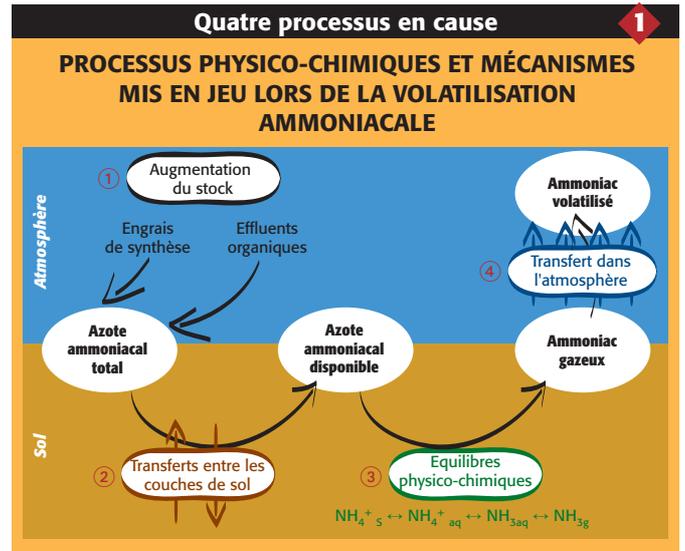
**Un phénomène de courte durée...**

La volatilisation ammoniacale résulte de quatre processus : l'augmentation du stock d'azote ammoniacal au champ ; les transferts entre les couches de sol ; les équilibres entre les différentes espèces ; le transfert dans l'atmosphère (*figure 1*). La volatilisation débute après un apport de fertilisant. Les émissions les plus fortes sont observées au cours du premier jour suivant l'apport. C'est ainsi un phénomène de courte durée (6 à 15 jours), caractérisé par une dynamique logarithmique (*figure 2*), ce qui justifie

l'application des techniques de réduction des pertes dès l'apport, si l'on veut la limiter efficacement.

**...dont l'intensité dépend de nombreux facteurs**

L'augmentation du stock d'azote ammoniacal au champ est généralement liée à un apport de fertilisant de synthèse ou organique. La volatilisation dépend de la proportion d'azote de l'engrais susceptible d'être présent sous forme ammoniacale. Ainsi, le potentiel de volatilisation de l'urée est plus élevé que celui des solutions azotées, lui-même plus élevé que celui d'un ammonitrate. De même, la proportion élevée d'azote ammoniacal des lisiers (50 à 80 % de l'azote total), augmente le risque de perte, comparative-ment à un fumier dont la proportion en azote ammoniacal dépasse rarement 15%. Des travaux récents ont, en outre, montré le rôle du temps de dissolu-



tion des granules d'ammonitrate et de la durée de l'hydrolyse de l'urée de synthèse.

Les transferts entre les couches de sol réduisent de fait la disponibilité de l'azote ammoniacal en surface. En conséquence, tout facteur améliorant l'infiltration de l'azote diminue

la volatilisation. La dilution des lisiers et le travail du sol pour augmenter la porosité de surface sont ainsi deux facteurs sur lesquels l'agriculteur peut intervenir. De même, la pluie ou l'irrigation peuvent réduire significativement la volatilisation si elles se produisent peu de

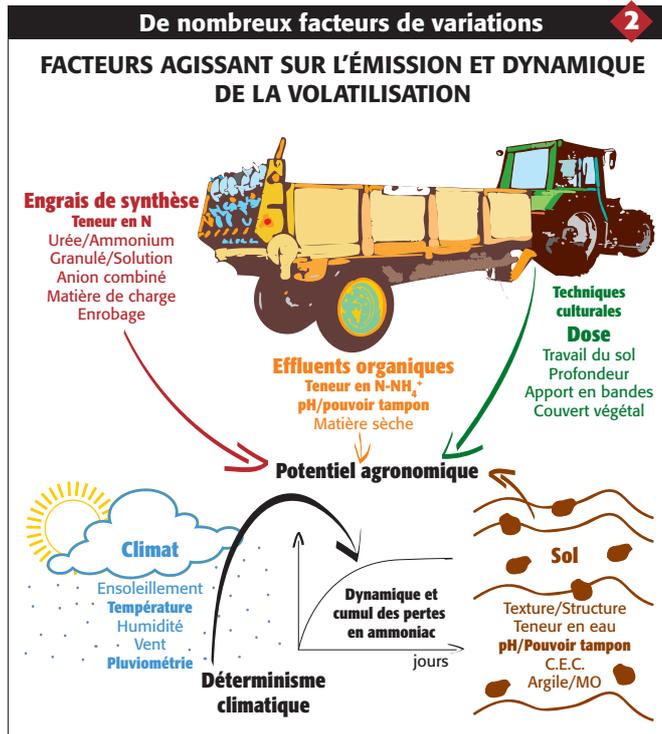
temps après l'épandage : elles favorisent non seulement l'infiltration, mais provoquent en plus une dilution de l'azote ammoniacal. La réduction de la volatilisation varie entre les situations, mais on peut espérer 20 à 50 % de diminution des pertes totales pour une pluie de 5 mm, contre 70 à 80 % pour une pluie supérieure à 10 mm. Il apparaît aussi évident que toute technique culturale conduisant à un apport en profondeur, même si cette profondeur n'excède pas quelques centimètres, limite les pertes par volatilisation.

**Le rôle déterminant de la température**

Les équilibres entre les différentes espèces (ammoniac - ion ammonium) et les différentes formes (adsorbée, en solution, gazeuse) déterminent la proportion d'azote ammoniacal sous la forme d'ammoniac gazeux. Ces équilibres sont régis par le pH, la température et la capacité d'échange cationique (CEC). Le pH et le pouvoir tampon du complexe sol-fertilisant sont ainsi les facteurs auxquels la volatilisation est la plus sensible, à partir du moment où l'azote ammoniacal reste disponible à la surface. Une augmentation d'une unité pH conduit à une augmentation

d'un facteur 10 de l'ammoniac gazeux en équilibre avec l'ammonium du complexe sol-fertilisant. La volatilisation est plus forte sur un sol calcaire que sur un sol acide. L'hydrolyse de l'urée alcalinise et augmente le pouvoir tampon du milieu, ce qui en fait le fertilisant de synthèse le plus susceptible à la volatilisation. La température agit exponentiellement : la proportion d'azote ammoniacal présente sous forme d'ammoniac gazeux double pour toute augmentation de la température de surface de 5 °C. Des essais conduits par le Cemagref avec des tunnels ventilés ont montré que la température peut expliquer 42 % de la variation observée sur les pertes. Une partie de l'azote ammoniacal peut enfin être adsorbée sur les argiles et la matière organique du sol, et n'est ainsi plus disponible pour la volatilisation. La volatilisation est en conséquence plus faible sur les sols argileux (CEC relativement élevée), que sur les sols sableux.

Le transfert dans l'atmosphère est essentiellement conditionné par la vitesse du vent, même si l'ensemble des conditions climatiques ainsi que l'état de surface sont aussi impliqués dans ce déterminisme.



**Réduire les pertes par un couvert végétal**

Les facteurs qui déterminent la volatilisation ammoniacale relèvent donc à la fois (fig. 2) :

- **de la nature du fertilisant** : les fertilisants de synthèse conduisent à des pertes beaucoup moins variables et plus faibles que les produits organiques ;
- **du type de sol** : des rapports

de pertes de 1 à 6 ont ainsi été observés entre sols ;

- **des techniques culturales** : le cas particulier de la réduction des pertes par un couvert végétal est très illustratif. Les couverts végétaux agissent directement sur le climat à la surface du sol (température, vent), et réabsorbent une partie de l'ammoniac gazeux émis. La volatilisation peut être significativement réduite, de 25 à 40 % dans le cas d'un lisier suffisamment dilué pour ruisseler sur la plante et atteindre le sol, voire maîtrisée dans des cas particuliers pour des fertilisants de synthèse. Ces résultats ont motivé la mise en place d'actions de sensibilisation des agriculteurs aux épandages de lisiers sur cultures en phase active d'absorption, dans l'Ouest de la France (apports sur du blé), au Royaume-Uni et dans les pays scandinaves. Le pourcentage des surfaces en blé fertilisées avec du lisier de porc au printemps est ainsi passé de 0 à 15 % en Bretagne en l'espace de quelques années ;
- **des conditions climatiques** : les pertes sont généralement beaucoup plus élevées en été qu'au printemps ou en automne.

**Le modèle VOLT'AIR : sans équivalent en Europe**

Le modèle Volt'Air est développé par l'Inra depuis 1993 pour les apports de lisier au champ, et a été récemment adapté aux fertilisants de synthèse dans le cadre d'une collaboration avec Grande Paroisse S.A. Le modèle mécaniste de volatilisation d'ammoniac synthétise de manière réaliste les principaux processus connus impliqués, que ce soient les équilibres entre les différentes formes d'azote ammoniacal, ou les transferts dans le sol et les transferts du sol vers l'atmosphère. Il calcule la volatilisation d'ammoniac à un pas de temps d'une heure, sur une période de quelques jours à quelques semaines, sur des parcelles aussi bien expérimentales que représentatives de la pratique agricole. Il simule les apports en surface, restituant un effet de flaqqage observé lors des apports de lisier par buse palette, et intègre deux types de techniques culturales : l'enfouissement après apport de lisier et l'irrigation, avant ou après tout type de fertilisation. Il prend en compte la nitrification, fortement concurrente de la volatilisation dans le cas des fertilisants de

synthèse. Il simule la dissolution des granules d'ammonitrate et l'hydrolyse de l'urée, et prend en compte explicitement l'évolution du pH du complexe sol-fertilisant de synthèse après l'apport. Ses paramètres et données d'entrée restent relativement faciles d'accès : analyses de sol, analyse classique du lisier ou propriétés de l'engrais de synthèse, informations générales sur le site et les techniques culturales pratiquées, variables climatiques obtenues sur une station météorologique classique. N'ayant pas d'équivalent dans la communauté internationale, il commence à être utilisé pour évaluer les techniques et les stratégies de réduction des pertes par volatilisation d'ammoniac en Europe. Il est, par exemple, possible de proposer des seuils d'irrigation après apport de lisier. Il a, en outre, vocation à être utilisé pour générer ou paramétrer des fonctions de volatilisation simples, pouvant être intégrées dans des modèles plus généraux de type bilans environnementaux et outils d'aide à la décision en matière de fertilisation raisonnée.

Les trois premiers facteurs fixent le potentiel agronomique de la volatilisation. La dynamique et le cumul réel des pertes sont ensuite liées aux conditions climatiques, qui constituent le déterminisme climatique.

### Un phénomène complexe difficile à prédire avec précision

La mise au point de logiciels de prédiction et d'estimation des pertes par volatilisation passe par la création de modèles. L'une des difficultés résulte de l'importance relative des facteurs de variation selon les situations et des multiples interactions. Par exemple, l'effet d'une pluie de quelques millimètres ou d'un enfouissement sur la réduction de la volatilisation dépend de l'intervalle de temps les séparant de l'apport et de l'intensité des pertes sur cet intervalle de temps, elle-même dépendante des facteurs

agronomiques et climatiques.

Dans ce contexte, les modélisateurs privilégient les modèles dynamiques, calculant les émissions à un pas de temps variant de 1 heure à la journée. Cependant, la prédiction et l'estimation des émissions d'ammoniac restent encore approximatives, du fait du manque de connaissances dans certains domaines et à sa forte sensibilité à certains facteurs. Très peu de modèles sont opérationnels, en raison de la difficulté de simuler certains processus à partir de paramètres facilement accessibles.

Le modèle Volt'Air développé à l'Inra de Versailles-Grignon pour les lisiers et les fertilisants de synthèse tente de faire appel à un nombre réduit d'informations tout en gardant des bases physiques, chimiques et biologiques conséquentes (*encadré 1*). Une version opérationnelle est attendue pour l'automne 2005. Les modèles empiriques,

essentiellement basés sur l'expérimentation, établissent des corrélations statistiques entre la volatilisation mesurée et les facteurs d'influence. Ils ont montré leurs limites : ils ne peuvent pas restituer les effets de chacun des facteurs et leurs interactions sur la volatilisation. Un modèle intermédiaire, STAL, faisant un bon compromis entre une base physique minimale et des paramétrages empiriques pour des fonctions mal connues, a été développé pour les lisiers à l'Inra de Rennes-Quimper (*encadré 2*).

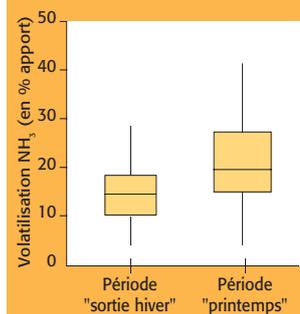
### Des connaissances pour agir dès maintenant

Les émissions d'ammoniac résultant de l'apport de produits organiques ou de fertilisants de synthèse peuvent être éminemment variables d'une situation à une autre et sont difficiles à prédire. La connaissance a cependant fortement progressé au cours des der-

Plus de risques au printemps : être vigilant lors des épandages

3

COMPARAISON DE LA DISTRIBUTION DES ÉMISSIONS TOTALES D'AMMONIAC ESTIMÉES PAR LE MODÈLE STAL, POUR LES PÉRIODES "SORTIE HIVER" ET "PRINTEMPS" (simulations sur la base de 134 scénari climatiques)



2



Les tunnels de ventilation, d'une surface expérimentale d'un mètre-carré, sont utilisés pour étudier l'effet d'un ou de plusieurs facteurs.

### STAL : réduire la volatilisation de l'azote ammoniacal des lisiers

2

Le modèle Stal de volatilisation de l'azote ammoniacal des lisiers, est basé sur une description simplifiée des processus physiques et chimiques déterminant l'émission de  $\text{NH}_3$ , et sur une approche empirique de l'infiltration de l'azote ammoniacal dans le sol et de l'élévation de pH consécutive à l'apport. Le transfert de l'azote ammoniacal et le pH sont en effet calculés à l'aide de fonctions paramétrées avec des données facilement accessibles : la dose de lisier (D, en  $\text{m}^3/\text{ha}$ ) et sa teneur en matière sèche (MS, en %), le pH du sol, et un paramètre indicateur de l'état de surface du sol. Les variables climatiques requises sont les valeurs moyennes journalières de la température de l'air et de la vitesse du vent, ainsi que la pluviométrie journalière. Notons enfin que les fonctions de calcul de l'infiltration de l'azote ammoniacal résultant d'une pluie ont été paramétrées à partir de simulations effectuées avec le modèle Volt'Air. Les paramètres requis par le modèle sont donc facilement accessibles. Les limites sont liées au caractère empirique des fonctions de transfert et le pH, paramétrées dans les sols limoneux acides de l'Ouest de la France, lui conférant une validité limitée à ce type de sol.

#### Enfouir le lisier au printemps

L'utilisation du modèle, associé à une approche climatique fréquentielle, a permis de caractériser l'effet de la variabilité climatique intra et inter-annuelle, et d'analyser l'influence de la période d'épandage sur la volatilisation. La figure 3 présente la distribution des pertes totales d'azote par volatilisation, pour un épandage de lisier réalisé en sortie d'hiver ou au début du printemps sur sol nu et sans enfouissement ( $D = 5 \text{ m}^3/\text{ha}$ ,  $MS = 8 \%$ ,  $\text{pH sol} = 5,7$ ). Le modèle simule une forte amplitude des émissions au sein de chaque période, et met en évidence une augmentation sensible de la volatilisation pour les épandages de mars et de début avril, comparativement aux épandages de fin janvier et de février. Cette approche permet ainsi de justifier la prise en compte d'un estimateur de la volatilisation différent pour chacune des périodes. La plus forte variabilité des pertes observée pour les épandages de mars et d'avril permet enfin de conclure à l'intérêt accru d'enfouir le lisier apporté au début du printemps.

nières années, et tend vers l'élaboration de modèles de prévision paramétrés pour différents types de fertilisants dans des conditions d'épandage très diverses.

La prise en compte du caractère polluant des émissions d'ammoniac par les pouvoirs publics, bien que relativement récente en France, s'est traduite par la création d'un groupe de travail du Comité d'Orientation pour des Pratiques Agricoles Respectueuses de l'Environnement (Corpen). Ce dernier a publié en juin 2001 une brochure de synthèse des connaissances, dont on peut espérer que la diffusion contribuera à accroître la prise en compte de conscience des enjeux économiques et environnementaux liés à ce processus.

Les techniques de réduction de la volatilisation au champ seront discutées dans un prochain article. ■