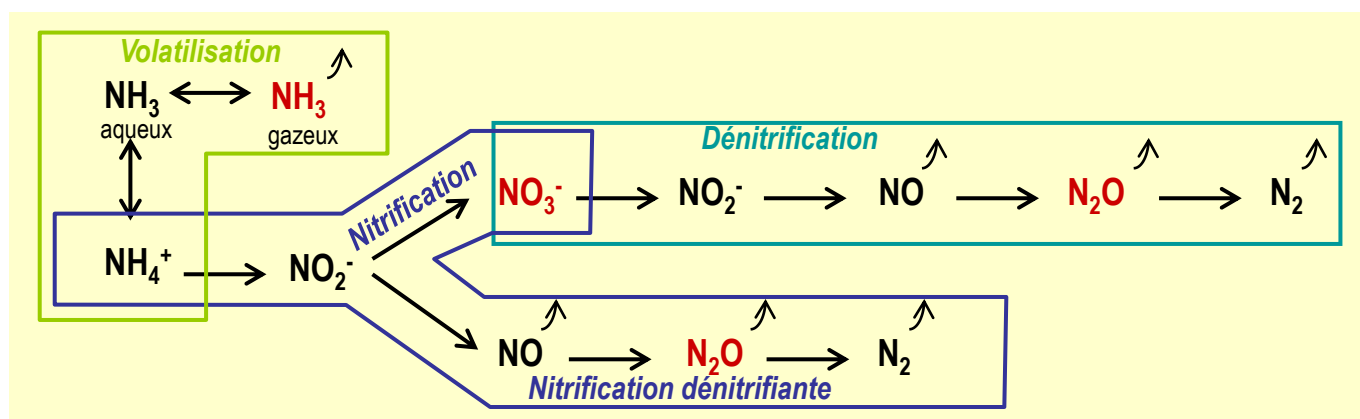


## L'essentiel à connaître...

### Eviter deux types de pertes suite à l'épandage : $\text{NH}_3$ et $\text{NO}_3^-$

Dans les heures ou jours suivant l'épandage interviennent les pertes d'azote par voie gazeuse sous forme d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) qui peuvent atteindre 80% de la fraction ammoniacale des lisiers (CORPEN, 2006). Le  $\text{NH}_3$  dégrade la qualité de l'air : il est donc à éviter. Par ailleurs, il se redépose en partie quelques kilomètres plus loin où il peut être transformé en nitrate puis lixivier : la volatilisation du  $\text{NH}_3$  doit donc être également maîtrisée dans un objectif de reconquête de la qualité de l'eau.

Dans les semaines et années qui suivent l'épandage, deux autres risques de pollution interviennent. Le  $\text{NH}_4^+$  se nitrifie (50% nitrifié en 8 à 10 jours après apport, Lambert et Morvan, 2013) et l'N organique se minéralise progressivement (quelques mois à années suivant l'apport) ; ces deux réactions libèrent du  $\text{NO}_3^-$  qui est sensible à la lixiviation. D'autre part, la nitrification et la dénitrification peuvent aboutir à la production (bien qu'en faibles quantité) de  $\text{N}_2\text{O}$ , un puissant gaz à effet de serre.



Le risque de pertes par lixiviation augmente lorsqu'on maîtrise les émissions de  $\text{NH}_3$ , puisque l'azote ammoniacal non perdu est rapidement transformé en nitrates ; il faut donc veiller à éviter l'ensemble de ces pollutions pour ne pas simplement reporter un risque de pollution vers un autre. Ces deux types de pollutions sont donc à éviter et se gèrent par des leviers différents.

Les pertes par volatilisation de  $\text{NH}_3$  et par lixiviation de  $\text{NO}_3^-$  dépendent des **caractéristiques de l'effluent** d'élevage épandu, des **conditions météorologiques** et **pédologiques**, et des **techniques culturales** : ces facteurs et les leviers correspondants sont détaillés dans la suite de cette fiche.

### Concernant les pertes par lixiviation

Le risque est d'autant plus important que :

- la lame drainante est importante : arrêter à l'automne, avant le début de la période de drainage, l'épandage d'effluents dont l'azote est rapidement disponible (lisier notamment) ; s'assurer d'un couvert efficace en période de drainage.
- la quantité d'azote disponible pour les cultures dépasse les besoins de celle-ci : anticiper la dynamique de libération d'azote biodisponible en fonction de la nature de l'engrais et raisonner les quantités et dates d'apports en fonction des besoins de la culture.

Si ces précautions sont respectées, les pertes par lixiviation ne sont pas plus importantes avec des effluents d'élevage de type lisier de porc qu'avec des engrais minéraux, à l'échelle d'une quinzaine d'années (Leterme et Morvan, 2010).

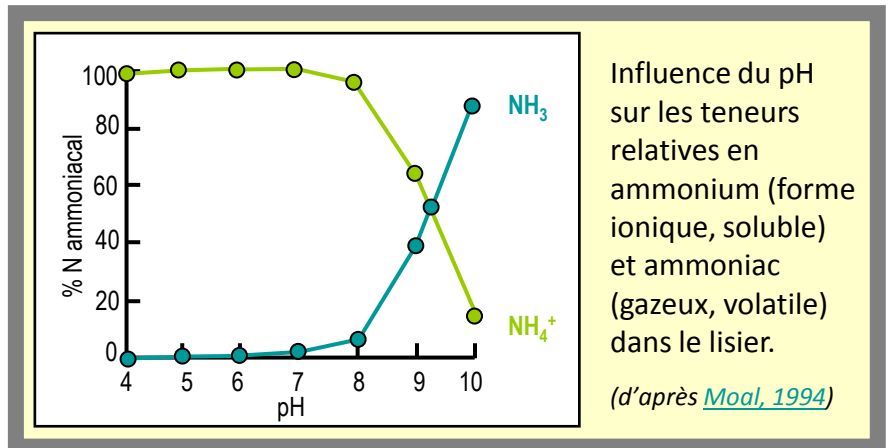
## Connaissances sur les effets des caractéristiques des effluents sur la volatilisation et la lixiviation d'N

### PERTES PAR VOLATILISATION DE $\text{NH}_3$

- **Teneur en azote ammoniacal ( $\text{NH}_4^+$ )** : cette forme d'azote, immédiatement utilisable par les plantes, présente néanmoins le risque d'être volatilisé sous forme de  $\text{NH}_3$  dans les heures suivant l'épandage. Les lisiers et phases liquides après séparation de phase, plus riches en azote ammoniacal que les fumiers et composts, présentent donc plus de risques à l'épandage ([Quideau, 2010](#)).

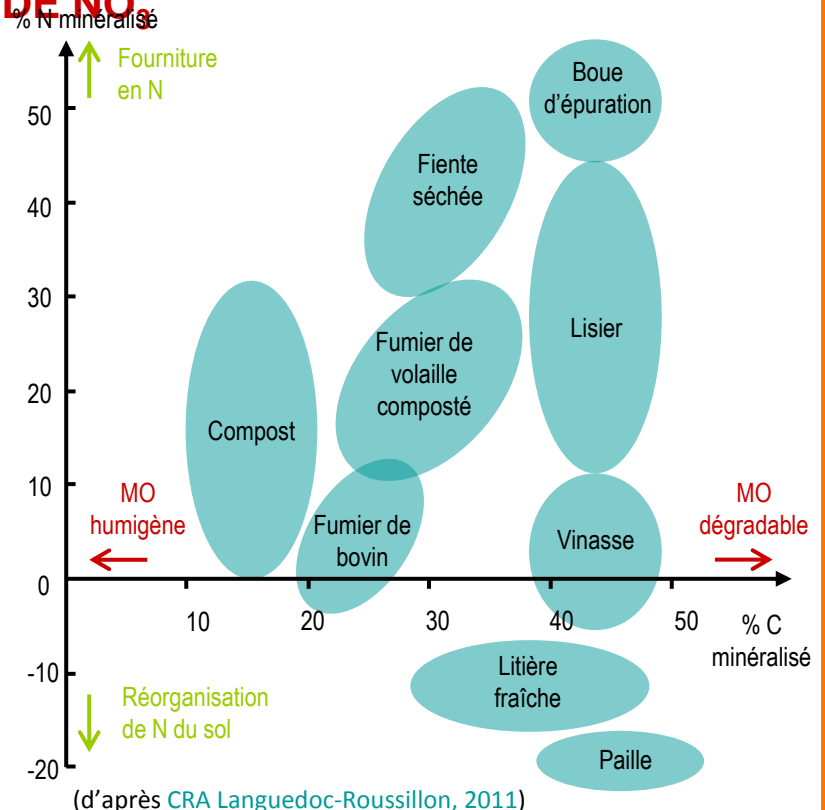
- **Teneur en matière sèche** : plus l'effluent est liquide et pauvre en matière sèche (ex : lisier, phase liquide après séparation de phase), plus il pénètre rapidement dans le sol, ce qui réduit la proportion d'azote ammoniacal perdu par volatilisation. Cependant, cette infiltration dans le sol n'est que partielle et ces effluents liquides étant généralement plus riches en azote ammoniacal, la quantité d'azote volatilisé est finalement plus importante.

- **pH** : l'équilibre entre les formes  $\text{NH}_3$  et  $\text{NH}_4^+$  se fait à pH 9,3 ; au-dessus, le  $\text{NH}_3$  volatile est majoritaire. Les engrais de ferme sont souvent basiques (pH 7-8,5, [CORPEN, 2001](#)), ce qui favorise la volatilisation d'ammoniac.



### PERTES PAR LIXIVIATION DE $\text{NO}_3^-$

- **Teneur en azote organique** de l'effluent d'élevage, **et sa proportion par rapport au carbone (C/N)** : la fraction organique de l'effluent est progressivement dégradée par les microorganismes du sol, libérant du nitrate par minéralisation ( $\text{C/N} < 15$ ) ou au contraire consommant de l'azote minéral du sol en l'organisant dans la biomasse microbienne ( $\text{C/N}$  élevé). Ainsi, les fumiers passent souvent par une phase consommatrice d'N avant d'en libérer ([Quideau, 2010](#)). Par ailleurs, la décomposition de la fraction organique est plus lente lorsque le C/N est élevé. Dans la directive nitrates, on distingue les engrais organiques de type 1 à  $\text{C/N} > 8$  (ex : fumier) des engrais de type 2 à  $\text{C/N} < 8$  (ex : lisier).



## Connaissances sur les effets des caractéristiques des effluents sur la volatilisation et la lixiviation d'N (suite)

La fraction organique est constituée de composés plus ou moins facilement décomposables : une partie est donc décomposée rapidement dans l'année (ex : urée), une autre le sera progressivement les années suivantes. La quantité d'azote minéralisable dans l'année dépend à la fois de la nature de l'azote apporté, du couvert, des modalités d'application de l'engrais et des conditions climatiques ([COMIFER, 2013](#)). L'azote des fumiers est d'autant plus stabilisé dans la matière organique qu'ils sont âgés ou compostés ([Quideau, 2010](#)).

Type d'effluent	Rapport C/N
Fumier de bovins très composté	11-14
Fumier de poulets de chair	9-11
Lisiers de bovins	8-10
Lisiers de porcs	4-6
Fientes de poules pondeuses	6-7

(d'après [CRA Languedoc-Roussillon, 2011](#))

L'effet direct d'un engrais organique (donné par la valeur du Keq : [COMIFER, 2013](#), page 42) est la fraction d'azote de l'engrais qui peut être valorisée par la culture suivant l'apport : il concerne donc l'azote minéralisable dans l'année et la fraction d'azote minéral de l'effluent.

Fientes de volailles	70%			20%	10%
Lisier de porc	60%		20%	20%	
Lisier de bovins	40%	30%		30%	
Fumier de bovins	10%	20%	70%		

(d'après [CA Marne, 2012](#))

Azote minéral

Azote minéralisé dans l'année

Azote minéralisé les années suivantes

} Keq

## Les leviers en lien avec les caractéristiques de l'effluent

### PERTES PAR VOLATILISATION DE NH<sub>3</sub>

- **Teneur en azote ammoniacal** : la concentration en azote d'un effluent peut être diminuée en jouant sur l'alimentation animale ([fiches 2a, 2b et 2c, Portejoie et al., 2002](#)) ou en diluant le lisier (Morvan et al., 2004b). Les effluents d'élevage sont à raisonner en fonction des périodes de besoin des cultures et de la proportion d'azote immédiatement utilisable par celles-ci. Se reporter aux références du [COMIFER \(2013\)](#) (p. 42), de la [DRAAF Bretagne \(2013\)](#) ou, pour les légumes, des [CA Bretagne \(2008\)](#) (pp. 15 et 40) pour connaître l'équivalence en engrais minéral de chaque effluent d'élevage, en fonction des périodes d'apport et de la culture. Etant donné la forte variabilité de la composition des effluents d'élevage, il est préférable si possible de doser l'azote total et l'azote ammoniacal sur l'effluent à épandre (analyse rapide type [Quantofix](#)).

- **Teneur en matière sèche** : les fumiers, qui ne s'infiltreront pas dans le sol, sont à incorporer dans les heures qui suivent l'épandage. Attention : l'infiltration des lisiers n'est que partielle : voir les techniques d'épandage permettant de réduire la volatilisation (dernière partie de cette fiche).

- **pH** : l'acidification du lisier pendant le stockage ou lors de l'application permettrait de favoriser la forme NH<sub>4</sub><sup>+</sup> par rapport à la forme NH<sub>3</sub> ; mais les quantités d'acides à mettre en œuvre du fait du fort pouvoir tampon des lisiers rend cette solution peu réalisable (Morvan et al., 2004b).

### PERTES PAR LIXIVIATION DE NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

- **Fraction organique de l'effluent** : pour établir le plan de fumure, connaître le sens et la vitesse de la minéralisation (libération ou organisation d'N) et prendre en compte l'effet direct de l'engrais. Choisir des effluents à libération rapide d'N (faible C/N, type lisiers) pendant la culture, et des effluents à organisation puis libération lente d'N (fort C/N, type fumiers) bien avant l'implantation de la culture.

## Connaissances sur les effets des conditions météorologiques sur la volatilisation et la lixiviation d'N

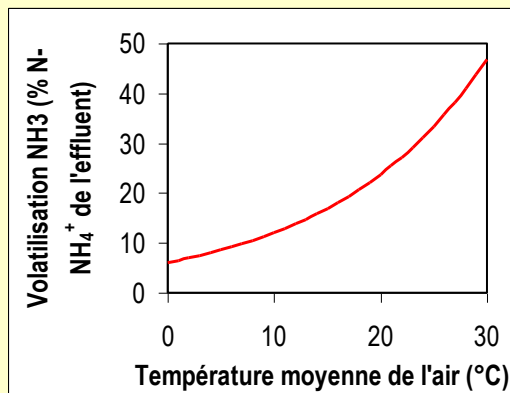
### PERTES PAR VOLATILISATION DE NH<sub>3</sub>

- Le facteur essentiel est la **température** ([CORPEN, 2001](#)).

- L'**hygrométrie** et la **vitesse du vent** favorisent également la volatilisation d'ammoniac ([CORPEN, 2001](#)).

Les fluctuations saisonnières de ces facteurs ont plus d'impact que les fluctuations diurnes : les pertes sont généralement plus élevées en été qu'au printemps

ou en automne, tandis qu'il y a peu de différences entre un épandage le matin ou le soir par rapport au midi.



Influence de la température sur la volatilisation d'ammoniac dans les 12 heures suivant l'épandage.

(d'après [Martinez et al., 1996](#))

### PERTES PAR LIXIVIATION DE NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

- Le facteur principal est le volume des **précipitations** en période de drainage, ou plus exactement la fraction des pluies qui percole dans le sol en dessous de la zone racinaire (lame drainante).

- Des conditions favorables de **températures** et d'**humidité** du sol (ainsi que son aération) à la **croissance du couvert** réduisent également les risques de lixiviation. Mais ces conditions régulent également les **vitesse de minéralisation** ou d'**organisation** par la biomasse microbienne (selon la valeur du C/N de la matière organique à décomposer : voir le paragraphe sur l'effet des caractéristiques des effluents).

## Les leviers en lien avec les conditions météorologiques

### PERTES PAR VOLATILISATION DE NH<sub>3</sub>

Pour réduire les pertes d'azote par voie gazeuse, privilégier des conditions fraîches et humides (ex : sortie hiver, ce qui permet de limiter la volatilisation à 10-30%, [Quideau, 2010](#)), sans vent, et si possible avant ou pendant une pluie fine afin de favoriser l'infiltration.

### PERTES PAR LIXIVIATION DE NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

Pour réduire les pertes par lixiviation, ne pas épandre à l'automne, avant le début de la période de drainage.

Le choix des conditions météorologiques est essentiel à l'épandage et, combinées aux besoins des cultures, à la nature des effluents et aux risques de compaction du sol en conditions détremées, les conditions optimales pour épandre représentent un fenêtrage étroit. Afin de valoriser au mieux les effluents, il est essentiel d'avoir une **capacité de stockage importante** (9-10 mois pour du lisier de porc) ([Quideau, 2010](#)).

### Connaissances sur les effets des caractéristiques pédologiques sur la volatilisation et la lixiviation d'N

Les émissions d'ammoniac peuvent varier d'un rapport de 1 à 6 entre deux types de sols ([CORPEN, 2001](#)). Les facteurs qui semblent être majoritairement impliqués sont ([CORPEN, 2001](#)) :

#### PERTES PAR VOLATILISATION DE $\text{NH}_3$

- **le pH** du sol, qui agit sur la volatilisation d'ammoniac de manière comparable mais moins efficacement que le pH de l'effluent, ce qui rend cette solution irréaliste ([CORPEN, 2006](#)).
- **la capacité d'échange cationique (CEC)**, qui retient l'ion ammonium  $\text{NH}_4^+$ , empêchant sa volatilisation sous forme d'ammoniac. La volatilisation est donc plus faible sur les sols à CEC élevée (tels que des sols argileux et riches en matière organique) que dans les sols sableux (Morvan et al., 2004a). Mais **cet effet de la CEC est très limité**.
- **la capacité d'infiltration** du sol (reliée à sa **texture** et sa **porosité**), qui réduit les pertes par volatilisation, une partie de l'effluent n'étant plus au contact direct avec l'air.

#### PERTES PAR LIXIVIATION DE $\text{NO}_3^-$

- **la capacité d'infiltration** du sol (liée à la texture et la porosité), qui accroît le drainage et les risques de lixiviation. Les textures fines (argiles, limons) qui stockent davantage d'eau sont moins drainantes que les textures grossières (sables) : le temps de transfert des nitrates en profondeur est donc plus long (Lambert et Morvan, 2013).
- **la profondeur du sol**, qui favorise l'enracinement, donc l'absorption d'N par les cultures, et limite le drainage dans les régions moyennement pluvieuses. La lixiviation est donc réduite car les nitrates peuvent davantage être valorisés avant d'atteindre le fond (plus profond) du profil de sol ([Ferchaud, 2006](#)).
- **les activités uréasiques et nitrifiantes** du sol, responsables de la transformation de l'azote du sol vers du nitrate.

### Les leviers en lien avec les caractéristiques pédologiques

Peu d'actions peuvent être menées pour intervenir sur ces facteurs, mais il est essentiel de connaître les risques liés à sa parcelle pour adapter ses pratiques et cultures et éviter d'épandre dans les situations à risque.

#### PERTES PAR VOLATILISATION DE $\text{NH}_3$

Pour réduire les pertes par volatilisation, éviter d'épandre sur sols compactés et desséchés, mais éviter également l'épandage sur sols collants ou détrempés pour ne pas dégrader la structure du sol. Favoriser plutôt l'épandage sur un sol de bonne portance en sortie d'hiver pour éviter l'altération de sa structure.

#### PERTES PAR LIXIVIATION DE $\text{NO}_3^-$

Pour évaluer les risques de lixiviation d'un sol, se reporter à la méthode de diagnostic proposée par le [COMIFER \(2002, page 17\)](#).

#### AUTRES PERTES D'N

Ne pas épandre sur des parcelles en pente pour éviter les pollutions par **ruissellement** (qui concernent plus l'azote organique dissout que les nitrates).



## Connaissances sur les effets des techniques culturales sur la volatilisation et la lixiviation d'N

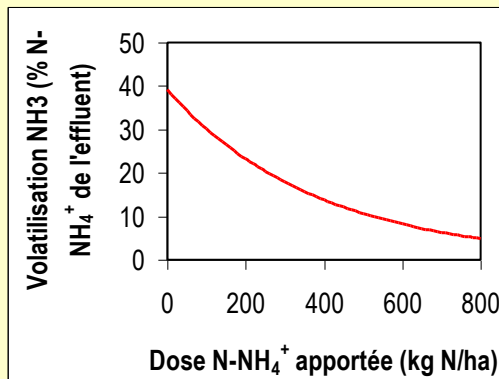
### PERTES PAR VOLATILISATION DE NH<sub>3</sub>

Les techniques culturales ayant un impact sur la volatilisation d'azote à l'épandage sont :

- le travail du sol avant épandage, qui améliore l'infiltration donc réduit la volatilisation
- les pratiques d'épandage : dose apportée, période d'apport (voir supra sur l'effet des conditions climatiques), techniques d'épandage (profondeur et répartition de l'apport)

#### • Dose d'azote ammoniacal apportée :

Le phénomène de saturation de l'air à proximité de l'effluent explique la plus faible **proportion** d'azote ammoniacal de l'effluent pouvant être volatilisé, quand on augmente la dose d'azote ammoniacal apportée. Mais **la quantité d'azote volatilisée augmente** avec la dose d'azote ammoniacal.



Influence de la quantité d'azote ammoniacal apportée sur la proportion volatilisée dans les 12 heures suivant l'épandage.

(d'après [Martinez et al., 1996](#))

#### • Technique d'épandage :

Les techniques actuelles visent à réduire la volatilisation de NH<sub>3</sub> en diminuant le contact entre l'effluent et l'air et favorisant une diffusion rapide jusqu'à la zone racinaire. Les coûts financiers sont partiellement compensés par le gain d'azote disponible pour la culture, à condition de le prendre en compte dans le calcul du bilan azoté. Plus de détails techniques : se reporter par exemple à Morvan et al., 2004b.

#### LISIERS :

##### Efficacité comparée de rampes d'épandage pour lisier

(adapté de [CORPEN, 2006](#))

L'injection, l'enfouissement du lisier ou son application sous couvert sont très efficaces pour réduire les pertes d'ammoniac ([Peyraud, Cellier et al., 2012](#)).

Epandage en plein		Indice 100
Epandage en ligne		Pas d'abattement
Injecteurs à soc		Abattement de 80 à 90%
Injecteurs à disques		Abattement de 50 à 70%
Dépôt surface : épandage avec sabots		Abattement de 50 à 90%
Dépôt surface et enfouissement par labour lors ou rapidement après épandage		Abattement de 80 à 90%

# Connaissances sur les effets des techniques culturales sur la volatilisation et la lixiviation d’N (suite)

## LISIERS (suite) :

L’injection de lisier présente néanmoins quelques inconvénients :

- difficulté de maîtriser le débit
- concentration de l’azote sur certaines zones, ce qui augmente les risques de lixiviation
- concentration d’ammoniac à proximité de la semence pouvant parfois être toxique pour celle-ci ([Brun et Cohan, 2013](#))
- risque de détérioration mécanique de la culture en place.

## FUMIERS et FIENTES de volaille :

Pour les fumiers et fientes, un enfouissement **immédiatement après apport** est le plus efficace ([Peyraud, Cellier et al., 2012](#)).

(d’après [Peyraud, Cellier et al., 2012](#))

Enfouissement par labour	Type d’effluent	Réduction de l’émission de NH <sub>3</sub>
Immédiat	Fumier bovin, porcin	90%
	Fientes volaille	95%
Dans les 12 heures	Fumier bovin, porcin	50%
	Fumier volaille	70%
Dans les 24 heures	Fumier bovin, porcin	35%
	Fumier volaille	55%

## PERTES PAR LIXIVIATION DE NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

Les techniques culturales ayant un impact sur les pertes d’azote par lixiviation successives à l’épandage sont :

- le travail du sol avant épandage, qui améliore l’infiltration donc facilite le transfert en profondeur du nitrate et sa lixiviation
- les pratiques d’épandage : dose apportée, période d’apport, présence/état du couvert végétal

### • Dose d’azote ammoniacal apportée :

La proportion d’azote volatilisé diminuant avec la dose d’azote ammoniacal apporté (voir paragraphe précédent), la quantité d’azote potentiellement lixiviable augmente d’autant plus rapidement avec la dose épandue. Il faut donc bien maîtriser la dose d’azote ammoniacal apporté par l’effluent : tout apport en excès (c’est-à-dire au-delà de ce que le couvert peut utiliser rapidement) est susceptible d’être perdu, d’autant plus par lixiviation que l’excès est important.

### • Couvert végétal :

L’azote ammoniacal ou nitrique non absorbé par le couvert risque d’être lixivié au cours de la période de drainage. Il est important de connaître les périodes de besoins en azote de la culture, la biodisponibilité de l’azote de l’effluent à épandre et les possibilités techniques d’épandage afin de déterminer les périodes d’apport :

- Les lisiers et phases liquides issues des séparations de phase, riches en azote minéral, sont à gérer comme les engrais minéraux, au plus près des besoins des cultures (ex : lisier de porc sur blé, lisier apporté juste avant le semis de maïs...) (Quideau, 2010).
- Au contraire, les fumiers et composts sont à utiliser en fumure de fond, avant l’implantation de la culture (février-mars pour le maïs) pour libérer l’azote lors des besoins de la culture. Les apports tardifs (avril-mai pour le maïs) sont déconseillés car ils peuvent avoir un effet dépressif sur la culture (l’immobilisation/organisation consommant l’azote) et augmentent les reliquats post-absorption, potentiellement lixiviables car l’azote du fumier est minéralisé alors que la culture n’en a plus besoin (Quideau, 2010).

Le risque de pertes par lixiviation de l’azote provenant des effluents d’élevage est faible à nul si les périodes d’apport sont bien calées par rapport aux besoins des cultures.

## PERTES PAR VOLATILISATION

- Pour limiter fortement les pertes par volatilisation, utiliser des techniques d'épandage permettant l'incorporation rapide de l'effluent dans le sol (enfouissement du fumier ou lisier par un labour, injection du lisier ou son application sous le couvert).

## PERTES PAR LIXIVIATION

- Ajuster la fertilisation aux stricts besoins des cultures, tout apport en excès étant perdu par lixiviation.
- Raisonner les périodes d'apport pour que les effluents soient valorisés au mieux par la culture, en tenant compte de la biodisponibilité de l'azote de l'effluent et des périodes de besoins de la culture.
- S'assurer de la présence d'un couvert bien développé en début de période de drainage (CIPAN, prairie, colza...) permettant d'absorber les reliquats azotés et l'azote minéralisé à l'automne.

## Pour aller plus loin...

- CORPEN (2006) *Les émissions d'ammoniac et de gaz azotés à effet de serre en agriculture*. CORPEN (Paris), 98 pages. [Lien](#)
- Lambert Y., Morvan T. (2013) Fortes pluies du printemps 2012 : Peu ou pas de pertes par lixiviation de l'azote des effluents. Terra, 363 : 35-37.
- Morvan T., Genermont S., Le Cadre E., Thirion F. (2004a) Volatilisation ammoniacale au champ : Comprendre pour maîtriser. Perspectives Agricoles, 302 : 16-20.
- Morvan T., Genermont S., Thirion F. (2004b) Maîtrise des émissions ammoniacales au champ : Les techniques qui marchent. Perspectives Agricoles, 304 : 24-27.
- Peyraud J.-L., Cellier P., (coord.) (2012) *Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres*. Expertise scientifique collective, rapport, Inra (France), 527 pages. [Lien](#)
- Quideau P. (2010) *Les effluents d'élevage, les coproduits de traitement et leurs incidences environnementales*. In: Espagnol, S., Leterme, P. (Eds.), Elevages et environnement. Educagri éditions, Editions Quae (Dijon, Paris, France), 260 pages.
- UNECE (2007) *Document d'orientation sur les techniques d'orientation sur les techniques de prévention et de réduction des émissions d'ammoniac*. United Nations, 40 pages. [Lien](#)

### Autres références citées :

- Brun D., Cohan J.-P. (2013) *Fertilisation sur orge de printemps : l'urée, un engrais à localiser avec précaution*. Perspectives Agricoles, 396 : 14-17.
- Chambres d'Agriculture de Bretagne (CRAB) (2008) *Fertilisation des légumes frais de plein champ : Guide pratique 2008*. Chambres d'Agriculture de Bretagne, 47 pages. [Lien](#)
- Chambre Régionale d'Agriculture du Languedoc-Roussillon (2011) *Les produits organiques utilisables en agriculture en Languedoc-Roussillon - Tome 1*. [Lien](#)
- COMIFER (2002) *Lessivage des nitrates en systèmes de cultures annuelles : Diagnostic du risque et proposition de gestion de l'interculture*. COMIFER (Paris), 41 pages. [Lien](#)
- COMIFER (2013) *Calcul de la fertilisation azotée : Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales – Cultures annuelles et prairies*. COMIFER (Paris), 159 pages. [Lien](#)
- CORPEN (2001) *Les émissions d'ammoniac d'origine agricole dans l'atmosphère : Etat des connaissances et perspectives de réduction des émissions*. CORPEN (Paris), 110 pages. [Lien](#)
- Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt de Bretagne (DRAAF Bretagne) (2013) *Arrêté du 5 juillet 2013 établissant le référentiel régional de mise en œuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée pour la région Bretagne*. 3 pages. [Lien](#)
- Ferchaud F. (2006) *Pratiques agricoles, fuites de nitrates et qualité de l'eau dans les bassins versants : Synthèse des références applicables au contexte breton*. Agrocampus Rennes, CEVA Pleubian, 132 pages. [Lien](#)
- Leterme P., Morvan T. (2010) *Mieux valoriser la ressource dans le cadre de l'intensification écologique*. Les colloques de l'Académie d'Agriculture de France, 1: 101-118.
- Martinez J., Moal J.-F., Caudal M.-C., Guiziou F. (1996) *Emission d'ammoniac après épandage de lisier : quantification et maîtrise*. Ingénieries EAT, 5 : 43-52. [Lien](#)
- Moal J.-F. (1995) *Volatilisation de l'azote ammoniacal des lisiers après épandage : quantification et étude des facteurs d'influence*. CEMAGREF (Rennes), 230 pages.
- Portejoie S., Doumad J.-Y., Martinez J., Lebreton Y. (2002) *Effet de la teneur en protéines de l'aliment sur la volatilisation ammoniacale des effluents porcins dans le bâtiment, au cours du stockage et à l'épandage*. Ingénieries, 32 : 27-39. [Lien](#)