

## Note\* sur l'amélioration des pratiques en vue de limiter les risques de pertes d'efficacité des apports azotés minéraux

### Contexte et enjeux :

Le calcul de la dose prévisionnelle d'azote à la parcelle suivant la méthode COMIFER permet d'estimer au plus juste, a priori, la quantité d'azote à apporter à la culture pour atteindre les objectifs de rendement et de qualité réalisables sans risque de pertes significatives d'azote dans l'environnement, en particulier par lixiviation.

La Directive Nitrate cible depuis sa création en 1991 la réduction des pertes en nitrate mais, dans sa septième version, un nouvel objectif vient s'ajouter au précédent : renforcer la cohérence du PAN -Programme d'Actions National- avec d'autres enjeux environnementaux liés à la gestion de l'azote tels que la qualité de l'air.

Dans ce cadre, la France s'est fixé différents objectifs, dont la réduction des émissions d'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) par volatilisation (94% d'origine agricole) : -13% en 2030 par rapport à 2005 (avec un objectif intermédiaire de -8% pour 2025-2029).

De même, concernant le protoxyde d'azote, la France vise une réduction de ses émissions en  $\text{N}_2\text{O}$  de -15% en 2030 par rapport à 2015. Ces 2 objectifs se retrouvent dans la Loi Climat et Résilience du 22 août 2021.

Enfin, la fertilisation azotée (minérale et organique) représente un poste important dans l'empreinte carbone associée à la production végétale. Les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  au champ sont directement proportionnelles à la quantité d'azote mise en jeu, ainsi réduire les pertes azotées, c'est utiliser moins d'azote par unité de production et donc limiter les émissions de GES -Gaz à Effet de Serre- au champ.

Au-delà de la définition de cette dose d'azote prévisionnelle, le suivi de bonnes pratiques agricoles permettra de garantir une bonne efficacité de chaque apport et par conséquent la limitation des fuites d'azote dans tous les compartiments de l'environnement.

En règle générale, les apports doivent se faire dans des conditions qui permettent à la fois de limiter les pertes gazeuses et d'assurer une absorption efficace de l'azote apporté :

- Incorporer autant que faire se peut les engrais (à l'installation de la culture ou quand c'est possible en végétation)
- Apport juste avant une pluie significative, ce qui assurera la solubilisation de l'engrais et une mise à disposition rapide de l'azote minéral pour les racines de la culture
- En période de croissance active de la culture, pour une assimilation rapide
- A une dose d'azote couvrant les besoins de la culture jusqu'au prochain apport ou jusqu'à la fin de la période de croissance de la culture

Les principales pertes d'azote au champ peuvent avoir lieu par lixiviation ( $\text{NO}_3^-$ ), par volatilisation ( $\text{NH}_3$ ) ou nitrification/dénitrification ( $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ). La volatilisation peut se traduire par des pertes très significatives sur une courte période suivant l'apport. Une bonne connaissance des facteurs de risques ainsi que des bonnes pratiques à mettre en œuvre doit permettre de limiter ce risque.

\*Cette note remplace la note « Prise en compte de la volatilisation des engrais minéraux » publiée par le COMIFER en 2013.

## Prise en compte de la volatilisation des engrais minéraux

Le calcul de la dose prévisionnelle d'azote ne doit pas tenir compte *a priori* de la volatilisation ammoniacale des engrais minéraux et se place dans la configuration « potentielle » d'efficacité maximale de l'engrais azoté. La prise en compte de cette perte, potentiellement très variable, ne doit pas intervenir *a priori* dans le calcul prévisionnel de l'apport total mais doit faire l'objet d'une analyse de risque pour chaque situation en utilisant une grille d'évaluation du risque, afin d'éviter ou de réduire au maximum la perte ammoniacale par des pratiques adaptées.

Il n'existe aujourd'hui aucune méthode simple et opérationnelle de prévision du poste Gx, pertes gazeuses aux dépens de l'engrais azoté et plus spécifiquement des pertes par volatilisation ammoniacale. Le poste Gx figure explicitement dans l'écriture complète du bilan prévisionnel mais il est omis dans la plupart des écritures opérationnelles (bilan de masse additif ou écriture CAU).

### La volatilisation de l'azote ammoniacal

La volatilisation d'ammoniac est le processus physico-chimique de passage de l'azote ammoniacal dissous dans la solution du sol vers sa forme gazeuse  $\text{NH}_3$  libérée dans l'atmosphère. Ce processus met en jeu trois équilibres, l'équilibre de solubilité (entre la phase gazeuse et la phase aqueuse de l'ammoniac), l'équilibre acido-basique (entre l'ammoniac et l'ion ammonium en phase aqueuse), l'équilibre d'adsorption (entre les ions ammonium en phase aqueuse et les ions ammonium adsorbés sur le complexe argilo-humique). Elle s'opère à la surface du sol à partir d'une source d'azote ammoniacal : engrais minéral ou produit résiduaire organique. Ce phénomène se produit rapidement après l'apport (quelques heures à quelques jours). Son intensité dépend des propriétés du sol (pH, pouvoir tampon, CEC, porosité et humidité de surface), de la couverture du sol, des conditions météorologiques (température, vent, pluviométrie) dans les heures et les jours qui suivent l'épandage ainsi que des formes d'engrais. Les pertes par volatilisation peuvent dépasser 40% des apports d'engrais minéral selon les formes et les conditions d'apport et 70% de la fraction ammoniacale des lisiers ou des digestats de méthanisation.

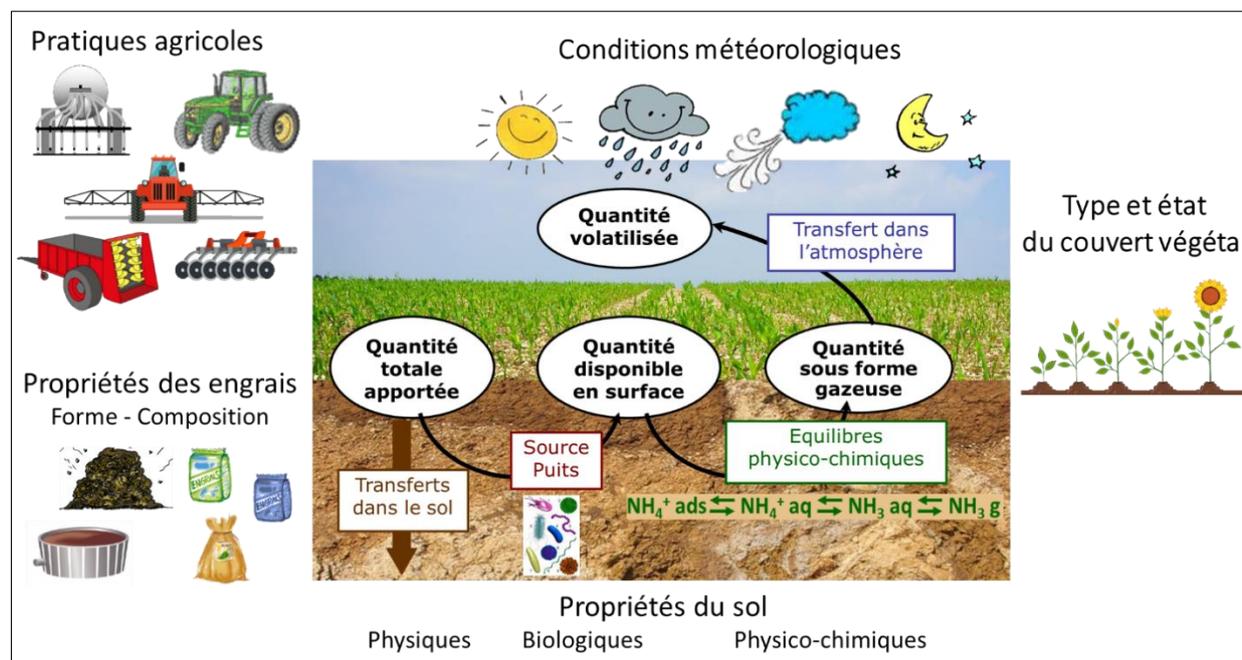


Schéma de synthèse du processus de volatilisation de l'azote ammoniacal. Source : INRAE, Sophie Générmont.

## I. Eviter ou réduire la perte ammoniacale par des pratiques adaptées

D'une manière générale, toutes les pratiques culturales qui tendent à maximiser l'efficacité de l'azote apporté (maximisation du coefficient d'utilisation de l'azote) doivent être privilégiées. Dans sa stratégie Farm to Fork, dans le cadre du Green Deal, la Commission européenne fixe comme objectif la réduction de 50% des pertes d'azote et de phosphore dans l'environnement à horizon 2030. En mai 2017, l'état a adopté le plan national de réduction des émissions de polluants atmosphériques (PREPA) qui doit permettre d'atteindre les objectifs de réduction des émissions annuelles en NH<sub>3</sub> pour la France qui sont de -13% en 2030 par rapport à 2005. L'ADEME a publié en 2019 un « guide des bonnes pratiques pour améliorer la qualité de l'air » qui présente les leviers disponibles et les bonnes pratiques à respecter pour limiter au maximum les émissions d'ammoniac en agriculture. Le plan PREPA 2022 est actuellement en cours d'élaboration. Concernant les engrais minéraux on peut retenir :

- 1) **Sur culture de printemps en pré-semis ou au semis/plantation** : incorporer les engrais à base uréique et ammoniacale (sensible à la volatilisation) et ne pas anticiper l'apport d'azote de plus de 15 jours avant l'implantation (afin de limiter également l'organisation microbienne)
- 2) **Sur culture de printemps type Maïs, Sorgho, Tournesol (fort écartement inter-rang) avec apport en végétation** : incorporer l'azote, en particulier pour les engrais à base uréique et ammoniacale, en profondeur (à 10-15 cm à l'aide d'un fertiliseur à contre type « Magendie ») ou à défaut par un binage/désherbinage superficiel (moindre efficacité)
- 3) **Sur cultures d'hiver ou céréales de printemps, pour les apports d'engrais à base uréique et ammoniacale en végétation**, épandre peu de temps avant un épisode pluvieux significatif prévu ou déclencher une irrigation de 10 à 15 mm après épandage quand c'est possible. Dans les limites du réalisable (organisation de chantier, stade de passage), différer un apport plutôt que de risquer de perdre jusqu'à 20-30% de l'azote apporté. Lors d'une période sèche se prolongeant, on pourra choisir d'apporter une dose réduite d'azote afin de minimiser les risques de pertes tout en permettant une mise à disposition minimale à la moindre condition favorable.  
Epandre de préférence en soirée afin de ne pas exposer les engrais azotés aux conditions très favorables à la volatilisation de la journée et dans le cas de la solution azotée, limiter les brûlures du feuillage
- 4) **En sol à pH élevé (>7.5)**, pour réduire d'une part le risque de pénaliser le rendement et la qualité et d'autre part l'impact environnemental, éviter le recours aux engrais les plus sensibles à la volatilisation
- 5) **Eviter les apports en conditions ventées et par températures élevées** (le vent nuit également à la précision de l'épandage).

## II. Utiliser une grille d'évaluation du risque pour caractériser chaque apport d'azote

Lorsqu'un engrais minéral est apporté en cours de culture sans possibilité ni d'enfouissement ou d'incorporation, ni d'infiltration à la faveur de précipitations ou d'une irrigation, une grille d'évaluation permet d'estimer le risque de perte d'efficacité associée à cet apport (en fonction du type de fertilisant azoté et des conditions pédoclimatiques). Cette grille est utilisable à chaque apport. Elle pourra servir pédagogiquement à évaluer le risque encouru pour des apports passés ou estimer les risques d'inefficacité d'un prochain apport et ainsi aider à identifier les meilleures conditions possibles. Il n'est pas conseillé de majorer les doses dans des conditions de non-valorisation des apports.

## Grille\* d'évaluation du risque de perte d'efficacité des apports d'azote minéral

Caractérisez, pour chaque apport d'azote minéral, les conditions pédoclimatiques et de cultures correspondant à votre situation, en évaluant les paramètres suivants.

			Note	Votre situation
<b>SOL</b>	pH	< pH 7	0	
		> pH 7 et < pH 7,5	2	
		> pH 7,5	3	
	CEC	< 12 meq/100g terre	2	
		> 12 meq/100g terre	0	
<b>COUVERTURE DU SOL PAR LA CULTURE</b>	En %	< 50%	0	
		> 50%	-2	
<b>CLIMAT</b>	Pluviométrie prévue à 3 jours	< 10 mm/3 jours	4	
		> 10 mm/ 3 jours	0	
	Vitesse du vent	<= 3 Beaufort (0 – 19 km/h)	0	
		> 3 Beaufort (>19 km/h)	2	
	Température du jour de l'apport	< 6 °C	0	
		[6-13] °C	3	
		> 13 °C	6	

\*Grille utilisable pour chaque apport d'azote minéral en surface

La note globale obtenue permet de qualifier les conditions de l'apport en se situant dans le tableau ci-dessous :

**NOTE=**

### Qualité des conditions d'apport de l'engrais minéral azoté

NOTE globale obtenue	< 4	[4-8]	[9-13]	> 13
<b>Ammonitrate ; Urée + inhibiteur d'uréase<sup>1</sup></b>	-	-	-	-
<b>Solution azotée <sup>2</sup></b>	-	-	-	-
<b>Urée solide</b>	-	-	-	-

### Conditions d'apports de la forme considérée

	Bonnes conditions d'apport, efficacité optimale de l'azote apporté
	Conditions moyennes pour lesquelles des pertes d'efficacité sont possibles
	Conditions limites, risques de pertes d'efficacité significatives
	Apport à éviter, l'efficacité de l'azote apporté peut être fortement réduite.

<sup>1</sup> tel que défini dans le règlement CE 2003-2003 et à partir du 16 juillet 2022 dans le règlement CE 2019/1009

<sup>2</sup> des essais préliminaires montrent qu'à composition équivalente, l'efficacité des formes liquides est plus faible que celle des formes solides

Le COMIFER et le RMT BOUCLAGE recommandent de positionner les apports azotés en phase végétative active et juste avant un épisode pluvieux. La majoration des doses en conditions défavorables n'est pas préconisée. Cette grille doit permettre de mieux caractériser les fenêtres optimales d'apport et de mettre en œuvre les bonnes pratiques agricoles pour une valorisation maximale des apports azotés.

**Les mesures de volatilisation au champ récemment réalisées en France dans le cadre de travaux sur le sujet (Projet ADEME EVAMIN) confirment que le facteur d'émission en NH<sub>3</sub> de l'urée est supérieur à celui de la solution azotée apportée dans les mêmes conditions. Toutefois, les nombreuses références françaises obtenues sur céréales à paille d'hiver montrent, en termes de rendement et de teneur en protéines, une moins bonne efficacité de la solution azotée par rapport à l'urée. L'hypothèse serait que pour la solution azotée, d'autres phénomènes viendraient réduire l'efficacité de cette forme, en plus de la volatilisation ammoniacale (réorganisation, dénitrification, ...). Les pertes d'efficacité estimées dans ce tableau ne sont qu'en partie dues à la volatilisation et en particulier pour la solution azotée. De manière plus générale, les formes liquides sembleraient moins efficaces que les formes solides. Des essais sont en cours et d'autres études doivent être conduites pour mieux comprendre les phénomènes en jeu et ainsi mieux identifier les conditions optimales d'application.**

En dernier ressort, le pilotage précédant les derniers apports sur les céréales à paille, offre la possibilité de corriger la nutrition azotée pour compenser, entre autres, une moindre efficacité de l'azote des apports précédents. Dans les cas où la mise en œuvre des bonnes pratiques n'aurait pas suffi à atteindre une efficacité maximale, le pilotage représente donc un moyen objectif d'évaluer l'intérêt d'un complément de dose d'azote pour compenser, a posteriori, les pertes d'efficacité des précédents apports.

## POUR EN SAVOIR PLUS

### 1. La perte ammoniacale des engrais minéraux

Les pertes annuelles d'ammoniac dans l'atmosphère représentent aujourd'hui l'équivalent de 485 kt de N (Citepa Secten 2020 - 589 kt NH<sub>3</sub>). L'agriculture est le principal contributeur avec 94% des émissions qui se répartissent de la façon suivante : élevage, engrais et amendements organiques et pâtures : 71% ; engrais minéraux : 28%.

Limiter la volatilisation ammoniacale des produits résiduels organiques et des engrais minéraux constitue donc un levier majeur pour économiser de l'azote en maximisant l'efficacité des apports et pour préserver la qualité de l'air (The European Nitrogen Assessment 2011, Our Nutrient World- INI 2013). D'une manière indirecte, la volatilisation ammoniacale peut contribuer aux transferts d'azote réactif dans les eaux à travers son implication dans la cascade de l'azote. Aussi, une approche globale du cycle de l'azote et de ses impacts est nécessaire même dans le cadre d'une réglementation ciblant en premier lieu le transfert d'azote nitrique.

Abordé ici sous l'angle de la Directive Nitrate (91/676/CE) et des référentiels régionaux de mise en œuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée, l'ammoniac émis dans l'atmosphère n'en est pas moins soumis également à une directive européenne spécifique, la directive (UE) 2016/2284 appelée Directive NEC, régissant les plafonds d'émissions de divers polluants atmosphériques. L'ammoniac a des impacts multiples sur l'acidification des sols, l'eutrophisation et la biodiversité d'espaces naturels sensibles, la qualité de l'air et la santé humaine.

Sur la base des facteurs d'émission conventionnels (EMEP, 2019), les pertes d'ammoniac aux dépens des engrais minéraux s'élèvent en 2020 en France à 112 kt N/an soit 5,6% de l'azote minéral apporté (d'après le retraitement Citepa qui consiste à moyenner 3 campagnes Unifa pour estimer la consommation de l'année N - soit pour 2020 la moyenne des campagnes 2018-2019 ; 2019-2020 et 2020-2021, menant à une quantité estimée d'azote minéral apporté à 2 025 kt N minéral ; ref : Citepa, édition mars 2022. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France métropolitaine, format CEE-NU, <https://www.ceip.at/status-of-reporting-and-review-results/2022-submission>). Il apparaît évident que ces pertes par volatilisation d'ammoniac sont à la fois susceptibles de générer des impacts environnementaux négatifs et représentent également une perte économique privant l'agriculture d'une ressource en azote minéral.

Dès lors, la recherche de la maximisation de l'efficacité de l'azote des engrais s'inscrit dans une double logique convergente, environnementale et économique.

Concernant les engrais minéraux, les publications scientifiques majoritairement anglo-saxonnes sont nombreuses et relativement convergentes. La sensibilité des engrais azotés à la volatilisation ammoniacale varie selon leur type :

FORME N	Ammonitrate	Solution azotée	Urée+ inhibiteur d'uréase	Urée	Source
kg N volatilisé pour 100 kg N apporté en surface	1,2 – 3,4	7,8 – 10,4	4	12,8 – 17,3	EMEP 2019 OMINEA 2021

Pour les engrais ammoniacaux de type sulfate d'ammoniaque ou phosphate d'ammoniaque (DAP, MAP), le facteur pH du sol semble déterminant, les valeurs pour ces produits seraient proches des ammonitrates en sol à  $\text{pH} < 7$  et comparable à l'urée en sol alcalin (*EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009 – derived from Van der Weerden and Jarvis (1997) - NARSES National Ammonia Reduction Strategy Evaluation System - Webb & Misselbrook, 2004*). Depuis de nombreuses années, les pratiques initiées en France dans les années 1970-1980 pour compenser la volatilisation ammoniacale et la moindre efficacité agronomique des formes solution azotée et urée, ont été de majorer les doses de 0 à 15% selon les types de sols, les engrais et les cultures (*Le Souder C., Taureau J.C., Richard H., Berhaut F., 1997. Formes d'engrais ammonitrate et solution azotée : quelle incidence sur le rendement et la teneur en protéines du blé tendre d'hiver. Perspectives Agricoles, 221 (février), 67-74 ; Gérer la fertilisation azotée du maïs dans le sud-ouest - Arvalis., ARVALIS 2008*). Justifiées et expérimentalement démontrées du point de vue du rendement et en partie de la teneur en protéines des céréales, ces majorations de doses n'intègrent pas la gestion du risque d'émissions d'ammoniac dans l'atmosphère, ni des autres impacts associés (par exemple les émissions directes et indirectes de  $\text{N}_2\text{O}$ ). Les objectifs français de réduction des émissions de  $\text{NH}_3$  (-13% en 2030 par rapport à 2005) et de  $\text{N}_2\text{O}$  (-15% en 2030 par rapport à 2015) font des majorations de dose d'azote par manque d'efficacité une pratique à éviter. Seules les bonnes pratiques agricoles doivent permettre d'atteindre les objectifs de production par la maîtrise d'un niveau élevé de l'efficacité de l'azote apporté.

## 2. Les principaux déterminants de la volatilisation ammoniacale des engrais minéraux

La volatilisation ammoniacale est d'abord un processus physico-chimique dont l'intensité est sous la dépendance des facteurs du milieu. La bibliographie scientifique et les nombreux écrits de vulgarisation ont identifié ces principaux facteurs :

		<b>Effet majorant</b>	<b>Effet minorant</b>
SOL	<b>pH</b>	pH alcalin	pH acide
	<b>CEC</b>	Faible CEC	Forte CEC
	<b>Humidité du sol</b>	Faible	Normale
CLIMAT au moment de l'apport	<b>Température</b>	Elevée	Faible
	<b>Pluviométrie</b>	< 5-10 mm	> 5-10 mm
	<b>Vent</b>	Présence	Absence
	<b>Flux évapotranspiration</b>	Elevée	Faible
CULTURE	<b>Couvert végétal</b>	Sol nu ou faible couvert	Couvert développé
	<b>Vitesse de croissance</b>	Faible	Elevée
PRATIQUES CULTURALES	<b>Modalités d'apport</b>	Apport en couverture	Incorporation Pré-semis ou localisation
	<b>Irrigation après apport</b>	Absence	Présence
CHOIX DU FERTILISANT	<b>Surface d'échange engrais –sol – atmosphère</b>	Engrais liquides	Engrais solides
	<b>Augmentation ponctuelle du pH due à l'hydrolyse de l'urée</b>	Azote uréique	Nitrate de calcium, de sodium de potasse

### 3. Les leviers d'action pour réduire la volatilisation ammoniacale des engrais minéraux

Différents documents et revues bibliographiques citent et quantifient des mesures pratiques pouvant diminuer ces pertes :

Technique de réduction	% de réduction	Conditions pour une efficacité maximale	Contraintes de mise en œuvre
Epandage en plein en surface	Technique de référence		
<b>Irrigation</b>	40-70%	Immédiatement après apport	Cultures irriguées uniquement
		Quantité minimale : env. 10 mm	Selon disponibilité matériel
<b>Incorporation profonde</b>  <b>Localisation au semis et/ou en végétation</b>	80-90%	Variable selon la profondeur de travail (l'efficacité augmente avec la profondeur)  Assurer une fermeture rapide du sillon	Culture de printemps (maïs, sorgho, tournesol, betterave, pomme de terre) pour lesquelles l'écartement large des rangs permet l'incorporation en végétation à l'aide d'outils à coutre.
<b>Incorporation en pré-semis</b>	50-80%	Profondeur d'incorporation minimale de 10 cm	Cultures de printemps
			Façon culturale supplémentaire
			Compatibilité travail du sol simplifié
<b>Inhibiteur d'uréase</b>	70%	Pour urée	
	40%*	Pour solution azotée	
<b>Engrais enrobé à libération progressive et contrôlée</b>	30%	Engrais solide	
<b>Substitution de forme N</b>	90%	Dans les situations les plus exposées aux pertes	

\* Efficacité des inhibiteurs d'uréase : l'expérimentation au champ montre peu d'effet d'amélioration de l'efficacité de l'azote avec les inhibiteurs d'uréase associés à la solution azotée ; de plus, aucune offre commerciale n'existe actuellement sur le marché.

#### D'après UNECE 2012, Corpen 2006

Des mesures pratiques existent donc pour limiter ces pertes mais du point de vue économique, ces leviers d'action peuvent présenter un coût supplémentaire apparent pour l'agriculteur : coût direct (engrais) ou coût indirect (équipement spécifique, charge de carburant, temps/ha). L'amélioration du rendement et de la qualité ainsi que la moindre sensibilité aux conditions climatiques permettront de conserver une rentabilité pour l'agriculteur.