
Note sur l'amélioration des pratiques en vue de lutter contre 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 la quantité d'azote à apporter à la culture pour atteindre les objectifs de rendement et de qualité réalisables sans risquer de pertes significatives d'azote dans l'environnement, en particulier par lixiviation.

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

On peut ainsi signaler les objectifs français concernant la réduction des émissions d'ammoniac (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 N_2O 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 N_2O 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 au champ au minimum.

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 de limiter les pertes gazeuses et une absorption rapide 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)
- 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 la fin de la culture

Les principales pertes d'azote au champ peuvent avoir lieu par lixiviation (NO_3^-), par volatilisation (NH_3) ou nitrification/dénitrification (N_2O , N_2). La volatilisation peut se traduire par des pertes très significatives sur une courte période suivant l'apport et une bonne connaissance des facteurs de risques ainsi que des bonnes pratiques à mettre en œuvre doit permettre de limiter ce risque.

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). Seuls certains outils dynamiques disposent d'une estimation a priori de la volatilisation.

POSITIONNEMENT DU SUJET EFFICIENCE / RELATION RENDEMENT

La volatilisation de l'azote ammoniacal

La volatilisation d'ammoniac est le processus physico-chimique de passage du NH_4^+ adsorbé sur le complexe argilo-humique ou dissous dans la solution du sol vers sa forme gazeuse NH_3 libérée dans l'atmosphère. 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). Les pertes par volatilisation peuvent dépasser 20 % 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. L'intensité du phénomène dépend des propriétés du sol (pH, pouvoir tampon, humidité de surface) et des conditions climatiques (température, vent, pluviométrie) dans les heures et les jours qui suivent l'épandage.

1. 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_3 pour la France qui sont de -13% en 2030 par rapport à 2005 (avec un objectif intermédiaire de -8% pour 2025-2029). L'ADEME a publié en 2019 un « guide de 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 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 coutre type « Magendie ») ou à défaut par un binage/désherbinage superficiel (moindre efficacité)

Commenté [PG1]: Pour des doses > 150 u/ha, les sucriers recommandent au moins 3 semaines car parfois manque sélectivité ; à valider avec ITB

- 3) **Sur cultures d'hiver ou céréales de printemps, pour les apports** d'engrais à base uréique et ammoniacale **en végétation**, épandre peu avant un épisode pluvieux significatif prévu ou déclencher une irrigation de 10 à 15mm 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. **Avec la solution azotée**, épandre de préférence en soirée afin d'éviter les conditions très favorables à la volatilisation de la journée et de limiter les brûlures du feuillage.
- 4) **En sol à pH élevé > 7.5**, pour ne pas risquer une pénalisation du rendement et de la qualité ainsi qu'un impact environnemental majoré, 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).

2. Utiliser une grille d'évaluation du risque pour caractériser chaque apport d'azote,

Lorsqu'un engrais minéral est apporté en plein en cours de culture sans possibilité d'enfouissement/incorporation ou infiltration, une grille d'évaluation permet d'estimer le risque de perte d'efficacité associée à cet apport.

Cette grille est utilisable à chaque apport. Elle pourra servir pédagogiquement à évaluer le risque pris pour des apports passés ou estimer les risques d'inefficacité d'un prochain apport et ainsi aider à déterminer comment réduire ce risque.

Grille d'évaluation du risque de perte d'efficacité, utilisable pour chaque apport d'azote minéral en surface sur végétation

date d'apport :

Parcelle :

Culture :

note

Votre situation

SOL	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		
COUVERTURE DU SOL PAR LA CULTURE	En %	<50%	0	
		>50%	-2	
CLIMAT	pluviométrie prévue à 3 jours	<10 mm/3 jours	4	
		> 10 mm/ 3 jours	0	
	vitesse du vent	<=3 Beaufort (0 -19km/h)	0	
		> 3 Beaufort (>19km/h)	2	
	température jour de l'apport	< 6°c	0	
		[6-13]°c	3	
	> 13°c	6		
* somme de la colonne			NOTE globale *	= 0

Qualité des conditions d'apports de l'engrais minéral azoté

<u>NOTE globale obtenue</u>	<u><4</u>	<u>[4-8]</u>	<u>[9-13]</u>	<u>> 13</u>
<u>Ammonitrate ; Urée avec inhibiteur d'uréase¹</u>				
<u>Solution azotée toutes cultures²</u>				
<u>Urée solide toutes cultures</u>				

¹ tel que défini dans le [règlement CE 2003-2003](#)

² de manière générale, il semblerait que l'efficacité des formes liquides soit plus faible que celle des formes solides

Commenté [VG2]: indiquer plutôt le CE 2019/1009 (si la définition convient) car le CE 2003/2003 sera bientôt obsolète

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
	Apport à éviter, l'efficacité de l'azote apporté peut être fortement réduite.

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_3 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. Le pilotage représente donc un moyen objectif de compenser a posteriori les pertes d'efficacité des précédents apports dans le cas où la mise en œuvre des bonnes pratiques n'aurait pas suffi à atteindre une efficacité suffisante.

Commenté [VL3]: Une des hypothèses pouvant expliquer la moindre efficacité de la solution azotée, notamment dans les sols calcaires, est la charge en cailloux (souvent poreux). Le liquide rentre dans les cailloux et ce n'est pas le cas avec les granulés !

ANNEXES

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 NH₃). 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 Nitrates (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 NEC (2001/81/CE), 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 2016), les pertes d'ammoniac aux dépens des engrais minéraux s'élèvent en 2018 en France à 132 kt N/an soit plus de 6,4% de l'azote minéral apporté (d'après les statistiques UNIFA 2055 kt N minéral sur la campagne 2017-2018-).

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 100kg N apporté en surface	2	8	4	13,2	OMINEA 2021 d'après EMEP 2016

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 pH < 7 et comparable à l'urée en sol alcalin (EMEP/EEA *emissioninventoryguidebook 2009 - derivedfrom Van der Weerden and Jarvis (1997) - NARSES National AmmoniaReductionStrategy 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 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 N₂O). Les objectifs français de réduction des émissions de NH₃ (-13% en 2030 par rapport à 2005) et de N₂O (-15% en 2030 par rapport à 2015) font des majorations de dose d'azote par manque d'efficacité une pratique à proscrire. 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.

Commenté [PG4]: A partir de quelle date est publiée la communication ?
En clair, le contenu grille volatilisation des arrêtés GREN devient caduc pour le printemps 2022 ?

2. LES PRINCIPAUX DETERMINANTS DE LA VOLATILISATION AMMONIACALE DES ENGRAIS MINERAUX

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 :

		Effet majorant	Effet minorant
SOL	pH	pH alcalin	pH acide
	CEC	Faible CEC	Forte CEC
	Humidité du sol	Faible	Normale
CLIMAT au moment de l'apport	Température	Elevée	Faible
	Pluviométrie	< 5-10 mm	> 5-10 mm
	Vent	Présence	Absence
	Flux évapotranspiration	Elevée	Faible
CULTURE	Couvert végétal	Sol nu ou faible couvert	Couvert développé
	Vitesse de croissance	Faible	Elevée
PRATIQUES CULTURALES	Modalités d'apport	Apport en couverture	Incorporation Pré-semis ou localisation
	Irrigation après apport	Absence	Présence

CHOIX DU FERTILISANT	Surface d'échange engrais –sol – atmosphère	Engrais liquides (azote uréique et/ou ammoniacale)	Engrais solides
	Augmentation du pH autour du granulé d'urée	Azote uréique	Nitrate de calcium, de sodium de potasse

Commenté [VG5]: Je suis d'accord avec cette classification, mais j'ai l'impression que l'on mélange différents processus...

Surface d'échange :

Est-elle vraiment différente entre l'urée et les ammonitrates ?
Je ne pense pas : la distinction se fait plutôt sur forme liquide /
granulés et l'urée me semble-t-il devrait être classée comme les
ammo sur ce critère

La surface d'échange sol-engrais est-elle un facteur agissant sur la
volatilisation ou sur l'organisation microbienne (dans le second cas,
c'est un peu hors sujet par rapport au tableau qui porte sur la
volatilisation

L'effet « alcalinisant » de l'engrais concerne-t-il seulement l'urée ou
aussi la solution ?

Il s'agit d'une vraie question de ma part !

⇒ si la réponse est oui, alors pour ce critère, la solution est dans
la bonne colonne mais il faudrait plutôt indiquer « auto
augmentation du pH à proximité des formes d'azote uréiques » et
ne pas mentionner « granulé d'urée ».

⇒ Si la réponse est non, alors pour ce critère, la solution devrait
être dans la colonne de l'ammo

Je suis étonné qu'on n'évoque pas également le taux d'azote
uréique + ammoniacal des engrais, susceptible d'être exposé à un
moment ou un autre, à la volatilisation (100% pour d'urée, 75% pour
la solution et seulement 50% pour les ammos)

Commenté [VG6]: Je comprends très bien l'idée qu'il y a
dernière mais la tournure « auto augmentation » me paraît un peu
confuse.

⇒ « alcalinisation générée par le granulé d'urée dans son
environnement proche » ou « élévation du pH générée (ou
induite) à proximité immédiate du granulé d'urée <,

3. LES LEVIERS D'ACTION POUR REDUIRE LA VOLATILISATION AMMONIACALE DES ENGRAIS MINERAUX

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

Technique de réduction	% de réduction	Commentaires	Mise en œuvre
Epandage en plein en surface	Technique de référence		
Irrigation	40-70%	Immédiatement après apport	Culture irriguée
		Quantité : env. 10 mm	Disponibilité matériel
Incorporation profonde	80-90%	Profondeur de travail	Culture de printemps (maïs, sorgho, tournesol, betterave)
Localisation au semis et/ou en végétation		Fermeture du sillon	Ecartement de semis
Incorporation en présemis	50-80%	Immédiatement après apport	Culture de printemps
		Profondeur d'incorporation	Façon culturale supplémentaire Compatibilité travail du sol simplifié
Inhibiteur d'uréase	70%	Pour urée	
	40%	Pour solution azotée	
Engrais enrobé à libération progressive et contrôlée	30%	Engrais solide	
Substitution de forme N	90%	Dans les situations les plus exposées aux pertes	

Source 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.

Commenté [PG7]: Les additifs testés en mélange avec sol N donnent des résultats peu différents de Sol N solo donc 40 % ? ; Volatilisation, efficacité ?

Commenté [AC8]: Les 2 valeurs 70 % et 40 % me surprennent également, quelles en sont les sources, mesures en conditions contrôlées ?
Concernant les formes solides : dans les expé aux champs nous avons vu équivalence des urées imprégnées NBPT vis-à-vis de l'ammo, il y a aussi une part de volat avec l'ammo qui explique je suppose la part non réduite (les 30% restants) ? mais est-ce que l'utilisateur sera en mesure de le comprendre ...
Concernant les 40 % pour les formes liquides, également d'accord avec la remarque de Philippe, quelles sources pour cette valeur ? De plus NBPT n'est pas homologué pour cette utilisation, et les autres produits proposés sur ce créneau ne me semblent pas à la hauteur de ce que nous avons pu voir avec les NBPT au vu des résultats dont je dispose.
D'un point de vue global, et sous réserve que certaines infos m'ont peut-être échappé ... je crains qu'il soit un peu délicat de mettre des chiffres précis dans cette rubrique

Commenté [PG9]: Ce n'est pas + comparativement aux additifs inhibiteurs d'uréase avec Sol N ci-dessus ?

Peut-être faire en annexe une fiche sur les pertes par dénitrification, et l'organisation microbienne ?

Commenté [VL10]: Oui et faire un tableau de synthèse en faisant la différence entre perte par volatilisation et efficacité globale