



**MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
ET DE L'ALIMENTATION**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



**MINISTÈRE
DE LA TRANSITION
ÉCOLOGIQUE**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Actualisation des connaissances permettant d'objectiver les variabilités des périodes recommandées pour l'épandage des fertilisants azotés en France

Synthèse

Décembre 2020

Marine Bedu



acta
LES INSTITUTS
TECHNIQUES
AGRICOLES#



La présente étude fait suite à une précédente étude menée en 2012 (ACTA-ARTELIA 2012) ayant pour objectif d'actualiser les références techniques et scientifiques concernant les facteurs et les paramètres qui déterminent les périodes d'apports d'azote favorables ou défavorables selon les contextes agropédologiques, plus spécifiquement sur la période automne-hiver. Le champ d'étude a été élargi pour cette nouvelle étude confiée à l'Acta par les ministères en charge de l'Agriculture et de l'Ecologie en 2020 : premièrement en prenant en compte les risques de pollution non seulement des eaux par le nitrate mais aussi de l'air par l'ammoniac, et deuxièmement en considérant les épandages des fertilisants azotés sur toute l'année.

Les objectifs de cette étude réalisée entre mars et novembre 2020 sont les suivants :

- ✓ Actualiser la typologie de fertilisants azotés à partir des connaissances sur les produits résiduels organiques (PRO) et sur les engrais minéraux, acquises depuis 2012, en prenant en compte l'effet de l'épandage des différents fertilisants azotés sur la qualité de l'eau mais aussi de l'air ;
- ✓ Compiler les références existantes sur les impacts des pratiques d'épandage (enfouissement par exemple) sur les différents compartiments de l'environnement (sols, eaux, air, plantes)
- ✓ En complément de la bibliographie : simuler avec les dernières versions disponibles du modèle STICS les impacts de différentes situations d'épandage sur les différents compartiments de l'environnement de manière intégrée : minéralisation, absorption, lixiviation du NO_3^- , mais aussi émissions de NH_3 dans l'air ; notamment analyser les épandages de printemps-été en complément de ceux d'automne-hiver et évaluer les interactions entre eux, et en particulier l'effet d'un report d'une partie des épandages au printemps sur les quantités d'azote lixiviées d'une part, et volatilisées d'autre part.

Mise à jour de la typologie des fertilisants azotés

La typologie élaborée se compose de 8 classes, synthétisées dans le tableau 1 :

- 5 classes (1 à 5) se distinguent entre elles par la dynamique de minéralisation de leur azote organique. En l'état actuel des connaissances, il reste difficile d'établir une relation générale entre des caractéristiques simples et opérationnelles et le comportement de minéralisation des fertilisants organiques mais les intervalles de valeurs du rapport C/N et de l'ISMO donnent tout de même une indication quant au comportement du produit ;
- Les 3 autres classes (6 à 8) se distinguent des précédentes par leur importante teneur en azote minéral total mais également entre elles selon la proportion d'azote ammoniacal et uréique impactant fortement le risque de volatilisation en cas d'apport de ces produits.

L'élaboration de la typologie s'est basée sur un nombre restreint de critères afin de rester opérationnelle donc nécessairement simplifiée par rapport à la grande diversité observée dans la réalité. Certains aspects qu'il aurait pu être intéressant d'intégrer n'ont pas été pris en compte (ex : infiltration dans le sol). Toujours dans cette même finalité d'opérationnalité, un certain nombre d'exemples sont également cités dans le rapport complet pour chaque catégorie. Il faut cependant signaler que l'on peut retrouver une même appellation de produit dans différentes classes, une même appellation pouvant désigner des produits aux comportements variés (digestats par exemple).

La typologie proposée dans cette étude a cherché à intégrer des fertilisants récents. Cependant les travaux associés à certains de ces nouveaux produits ne permettent pas toujours un recul suffisant mais il est possible de dégager quelques tendances sur le comportement de ces engrais vis-à-vis de l'azote rendu disponible. De nouvelles formes d'engrais de synthèse sont par exemple apparues sur le

marché et revendiquent une meilleure efficacité du fait d'une réduction des pertes et une absorption favorisée (ex : engrais enrobés, inhibiteurs d'uréase...) malgré des teneurs importantes en azote ammoniacal ou uréique.

Afin de pouvoir mobiliser cette typologie dans l'étude, un représentant (ou deux dans certains cas) par classe a été paramétré dans le modèle STICS. Ce choix méthodologique comporte cependant des limites : la variabilité au sein d'une même classe n'est pas considérée ici. Il aurait pu être intéressant de proposer systématiquement deux représentants contrastés par classe, illustrant la gamme de variabilité qui existe au sein d'une classe mais ce travail n'a pas pu être fait compte tenu de sa lourdeur. Il faut noter en outre que le représentant de la classe 4 présente une dynamique de minéralisation plus faible que ce qui était initialement envisagé et peut amener à sous-estimer le risque de pertes azotées pour cette classe.

Tableau 1 : Synthèse des classes de la typologie des fertilisants azotés

Classe	Description cinétique N	N minéral initial	N ammoniacal (+ uréique)	C/N	ISMO
1	Organisation nette à moyen terme	<20%		>20	
2	Minéralisation faible et très lente			10 -20	>70%
3	Minéralisation lente	20-40%			50-70%
4	Minéralisation importante et progressive			7-15	40-60%
5	Minéralisation importante et rapide			5-12	<40%
6	Forte proportion d'azote minéral	40-95%			
7	Fertilisants minéraux	>95%	< 50%		
8			> 50%		

Analyse de l'impact des périodes d'épandage dans différentes situations identifiées

Les situations traitées par simulation avec le modèle STICS

Le champ de l'étude étant vaste et la réalisation contrainte par le temps, il a été nécessaire de prioriser certaines situations à enjeux vis-à-vis des objectifs de l'étude, identifiées par un ensemble d'experts associés aux ministères en charge de l'Agriculture et de l'Ecologie. Ces enjeux sont liés à la représentativité d'une situation sur le territoire, à une problématique particulière concernant les risques de lixiviation ou de volatilisation et aux compléments d'informations que peuvent apporter des simulations par rapport aux connaissances déjà acquises. 8 situations ont donc été retenues et traitées au cours de l'étude :

- Épandage de fertilisants organiques sur couvert précédant un maïs
- Épandage de fertilisants organiques sur maïs
- Epandage fractionné de fertilisants minéraux sur maïs
- Épandage de fertilisants organiques sur prairie
- Épandage modéré de fertilisants en automne-hiver sur colza
- Épandage fractionné de fertilisants minéraux sur céréales d'hiver
- Épandage de fertilisants sur CI d'été en interculture courte
- Épandage de fertilisants sur CIVE et dérobées en interculture longue

En vue des simulations avec STICS, chacune de ces 8 situations est par la suite déclinée, selon le type de sol et de climat (l'étude a retenu 24 sites, avec deux à trois sols par site selon les situations) et l'itinéraire technique (tout particulièrement les pratiques de fertilisation), en une multitude de scénarios. Exceptée la classe 1, qui ne représente pas un fertilisant azoté au sens strict, les classes de fertilisants ont été utilisées dans les simulations en paramétrant dans le modèle un (ou deux) représentant pour chacune d'elle.

Les simulations ont été analysées principalement au travers des résultats obtenus pour la croissance et l'absorption des cultures mais aussi l'azote perdu par lixiviation et par volatilisation. D'autres variables ont également été étudiées afin d'approfondir la compréhension des déterminants ou de nuancer certains constats (par exemple, des indicateurs de stress azoté et hydrique, des variables d'état du sol, portance des sols...). Les analyses des résultats de simulation se sont surtout focalisées sur l'étude des tendances de variation des valeurs médianes et centiles 25 et 75 de ces indicateurs. Les valeurs extrêmes sont, selon les situations, traitées pour s'intéresser à l'effet de la variabilité climatique et l'identification de contextes pédoclimatiques extrêmes à risque. Pour s'affranchir d'une possible surestimation ou sous-estimation du modèle pour certains flux, les résultats sont principalement comparés les uns aux autres au travers de l'analyse des écarts obtenus selon l'évolution des différentes modalités testées plutôt que de traiter les valeurs absolues simulées. Cependant afin de donner quelques ordres de grandeurs de croissance des cultures et des niveaux de pertes, les variables de biomasse, d'absorption et de lixiviation sont présentées en valeurs absolues pour les scénarios témoins et permettent de positionner les surplus obtenus en cas d'apport par rapport à ces niveaux initiaux dans les différents contextes pédoclimatiques testés.

Il ressort de ces analyses un certain nombre de pratiques de fertilisation plus favorables par rapport à d'autres à la fois du point de vue des pertes cumulées d'azote volatilisé et lixivié mais aussi pour optimiser la valorisation du fertilisant par la culture, en fonction du pédoclimat de la situation considérée. Les pratiques les plus favorables mettent parfois en avant des périodes d'apport à privilégier selon le fertilisant mais il faut toutefois noter que les effets sur la volatilisation et la lixiviation sont parfois antinomiques, ce qui a mené à considérer un cumul des pertes globales. Les périodes les plus favorables sont en outre souvent dépendantes d'autres pratiques comme le fait d'épandre en surface ou d'incorporer immédiatement le produit ou de limiter la quantité d'apport mais aussi des conditions pédoclimatiques.

Bien que certains résultats soient communs à différentes situations traitées, les paragraphes suivants synthétisent les principales conclusions propres à chaque situation simulée.

Epandage de fertilisants organiques sur couvert précédant un maïs

Les simulations traitées lors de l'étude pour cette situation ont concerné différentes modalités d'apport de fertilisants organiques à l'automne précédant le semis d'un maïs et en présence d'un couvert en interculture semé en août. Elles montrent l'effet favorable des apports à cette période sur la croissance des couverts à l'automne et en hiver en particulier dans des contextes où la minéralisation humique est limitée, le climat à l'automne doux (cas des sites de la façade atlantique et de la Manche) et la levée peu ou pas retardée par une faible teneur en eau dans le sol autour de la date de semis (ce dernier cas étant resté peu fréquent dans les simulations). Pour des fertilisants organiques à libération progressive voire lente (classes 2 à 4), les apports d'octobre sont tout de même moins valorisés par la culture intermédiaire du fait d'une fourniture d'azote retardée alors que les apports réalisés entre juillet et septembre sont tous mieux valorisés par le couvert.

Concernant les risques de pertes liés aux classes 2 à 4 de fertilisants organiques, les épandages jusqu'à 70 kgN efficace (disponibles pendant le cycle de la culture) génèrent des surplus de pertes faibles (voire non significatifs pour la classe 2) pour les différentes dates d'apport testées entre l'été et l'automne. Le principal risque de pertes est lié à la volatilisation pour des apports de surface avant ou au semis en particulier pour des sols basiques. En cas d'apports de fertilisants libérant rapidement de l'azote (classes 5 et 6), les pertes par lixiviation après des apports de 45 à 50 kg N efficace restent également faibles sur cette période. En revanche, pour des quantités deux fois plus importantes (90 à 100 kgN efficace), la lixiviation est fortement impactée par des apports tardifs en octobre (entre le 10/10 et le 25/10).

L'apport de produits de classe 6, caractérisés par des plus fortes teneurs en azote ammoniacal et un risque accru de pertes par volatilisation, est plus favorable à la limitation de ces pertes s'il est enfoui immédiatement ou s'il est réalisé en végétation à l'automne.

Epandage de fertilisants organiques sur maïs

Pour cette situation, les scénarios simulés ont traité des apports de fin d'hiver et printemps (de février à juin) entre 50 kgN et 100 kgN efficace (disponible pour le maïs). Les doses d'azote total épandues varient entre 70 et 400 kgNtot.ha⁻¹ et sont identiques à celles apportées sous couvert dans la situation précédente afin de faciliter les comparaisons entre les deux situations. Lors d'apports de printemps, la date de l'épandage impacte peu les quantités simulées d'azote absorbé par le maïs sauf en cas d'apports tardifs 60 j après semis (juin) pour lesquels la valorisation est limitée de manière significative.

Les apports plus précoces au printemps ne semblent pas induire une augmentation des pertes par lixiviation, les quantités drainées étant souvent plus faibles que pendant la période automne-hiver précédente. Sur certains sols très drainants et à fourniture d'azote de plus de 100 kgN/ha sous maïs, la lixiviation au printemps reste néanmoins un phénomène important et peut provoquer des pertes plus conséquentes pour des apports 60 j avant semis. Le fait de retarder l'apport permet alors de réduire de manière non négligeable les quantités lixiviées. Au printemps, ce sont majoritairement les émissions ammoniacales qui expliquent de possibles pertes. La date d'apport au printemps n'est pas le levier principal pour limiter ces pertes, majoritairement influencées par le pH du sol, la teneur en azote ammoniacal du produit et le choix d'un apport en surface ou incorporé. Cependant pour des produits à forte teneur ammoniacale (classe 6), dans le cas où l'apport est fait en surface, la fertilisation 60 jours avant semis ou sous végétation très développée (60 jours près semis) semble permettre de réduire fortement les pertes par rapport à un épandage autour de la date de semis.

Les apports de printemps pour les différentes classes de produits organiques ont tendance à laisser de plus forts niveaux de reliquats en entrée d'hiver par rapport à des apports à l'automne, ce qui nécessite de porter une attention particulière à la culture implantée à la suite du maïs. Des apports à l'automne précédant semblent être plus favorables pour mieux synchroniser la fourniture d'azote par ces produits et l'absorption de maïs et laisser des reliquats plus faibles à l'automne suivant.

Epandage de fertilisants azotés minéraux sur maïs grain

Suite à l'évaluation de l'impact d'apports organiques sur maïs, cette situation s'intéresse à des pratiques de fertilisation minérale sur maïs grain, au travers du choix du fertilisant minéral et des choix de fractionnement. Les analyses des simulations pour cette situation ne permettent pas d'identifier des périodes d'apport de fertilisant azoté plus à risque concernant les pertes à la fois par lixiviation ou par volatilisation. Les résultats font principalement ressortir des risques de pertes importants pour une dose totale apportée de 200 kgN/ha quand cette dernière s'avère surestimée par rapport aux capacités d'absorption de la culture du fait de conditions favorables à un stress hydrique de la culture. Les

simulations mettent par ailleurs en avant sur une majorité des sites (et en particulier les sites non irrigués) une augmentation importante des reliquats entrée d'hiver à la récolte du maïs en cas d'apport de 200 kgN total/ha qui vient confirmer un risque de surfertilisation pour cette modalité d'apport.

Les écarts de pertes par volatilisation dépendent principalement des caractéristiques pédologiques du sol (en particulier le pH), du type de fertilisant et du mode d'apport (en surface ou en profondeur). Les simulations mettent en effet en avant le levier efficace que peut représenter l'enfouissement d'un fertilisant pour limiter les pertes par volatilisation. Toutefois cette pratique n'est pas toujours réalisable en particulier en végétation. Dans le cas d'un apport uniquement possible en surface, la classe 7 d'engrais azoté, présentant des teneurs en azote ammoniacal et uréique plus faibles, semble donc à privilégier.

Epandage de fertilisants organiques sur prairies

Les résultats de simulations réalisées sur prairie temporaire fauchée et recevant un apport organique (50 ou 100 kgN disponibles sur un an) entre septembre et avril semblent montrer que des épandages organiques de fin d'été et début d'automne sur prairie sont moins favorables, en particulier entre mi-septembre et mi-octobre. En effet, quelle que soit la classe de fertilisants organiques testée, les surplus d'azote absorbés par la prairie du fait de cet apport sont plus faibles qu'en hiver et au printemps, traduisant une moindre valorisation de l'apport d'azote par la plante. L'analyse des pertes met également en avant des pertes plus importantes sur cette période sauf pour les classes 2 et 3 qui induisent une augmentation négligeable des pertes quelle que soit la date de l'apport. Pour des apports de 50 kgN efficace de produits de classe 5 ou 6 entre mi-septembre et mi-novembre, ces pertes supplémentaires restent faibles voire négligeables mais le risque augmente pour 100 kgN efficace apportés. Bien que ces périodes d'épandage soient interdites dans la réglementation actuelle, les apports entre mi-novembre et mi-janvier induisent des pertes supplémentaires par lixiviation plus faibles que les apports d'automne précédemment évoqués. Toutefois l'analyse faite sur la portance des sols semble montrer un risque important de compaction des sols sur cette période en particulier pour du matériel d'épandage exerçant des contraintes élevées de l'ordre de 140 kPa.

Les apports de printemps, quelle que soit la classe de fertilisant organique, n'induisent pas de pertes par lixiviation et aucune augmentation de la volatilisation n'a été constatée par rapport à des apports d'automne et d'hiver, ce qui diverge des conclusions de précédentes études qui concluaient plutôt à une hausse des pertes ammoniacales pour des apports de fin de printemps en particulier pour des produits riches en azote ammoniacal.

Fertilisation azotée modérée d'automne-hiver sur colza

L'analyse des scénarios de fertilisation modérée (30 à 60 kgN/ha) à l'automne sur colza pour obtenir des colzas plus robustes dès l'hiver et limiter le risque lié aux ravageurs s'est focalisée sur des fertilisants minéraux ou à forte teneur en azote ammoniacal (classe 6) car rapidement disponibles. Elle montre que les apports d'automne peuvent augmenter la biomasse de la culture sans augmenter le risque de pertes azotées dans certaines conditions. Premièrement, les pratiques et conditions pédoclimatiques permettant d'éviter un retard de levée du colza, à savoir un semis précoce (avant la fin du mois d'août) et le taux d'humidité dans les premiers horizons autour de la date de semis, améliorent la valorisation du fertilisant apporté à l'automne. Deuxièmement, la diminution de la disponibilité de l'azote liée soit au faible reliquat laissé par la culture précédente, soit à la faible fourniture d'azote par le sol, augmente fortement l'effet positif sur la croissance d'un apport d'engrais à l'automne. Troisièmement, certaines pratiques de fertilisation sont identifiées comme favorables de manière générale à une bonne valorisation de l'azote apporté, comme une fertilisation en végétation

y compris pour les fertilisants organiques de classe 6. L'apport en végétation permet l'augmentation des niveaux de biomasse accumulée mais surtout retarde l'atteinte du plateau de croissance. Plus l'apport est tardif à l'automne (ici 15/10) plus cette tendance est observée. Il limite en outre les pertes par volatilisation ce qui peut toutefois être limité en cas d'apport au semis par l'enfouissement de l'engrais ou l'utilisation de produits de classe 7. La portance des sols, en particulier des sols argileux, peut toutefois être limitée en octobre mais elle semble laisser des fenêtres d'intervention sans risquer un tassement du sol. Les apports en surface de fertilisants organiques de classe 6 génèrent des pertes plus importantes que pour les engrais minéraux simulés. En cas d'apport de 60 uN, les simulations semblent mettre en avant une pratique favorable du fractionnement. Une telle dose peut tout de même générer des pertes non négligeables si les conditions ne sont pas favorables à une bonne absorption du colza à l'automne.

Des scénarios d'apport de 30 uN de fertilisants minéraux en janvier ont également été étudiés : ils ne permettent pas d'influer sur l'absorption et la biomasse du colza en automne et au début de l'hiver mais il faut tout de même noter que les pertes induites par ces apports s'avèrent faibles qu'il s'agisse de lixiviation ou de volatilisation. Les interventions à cette période ne sont pas pour autant toujours recommandées du fait d'une faible portance constatée en particulier pour des engins exerçant des contraintes de l'ordre de 140 kPa ou sur des sols argileux.

Epandage de fertilisants azotés minéraux au printemps sur céréales d'hiver

L'étude de la fertilisation minérale sur céréales d'hiver au travers de l'exemple du blé d'hiver a eu pour objectifs d'analyser non seulement l'impact de la précocité d'un premier apport en fin d'hiver sur les pertes azotées et en particulier sur la lixiviation, mais aussi l'impact sur les pertes azotées (et en particulier sur la volatilisation) des apports plus tardifs selon les choix de fractionnement. Les scénarios avec un apport à la mi-janvier s'avèrent présenter dans une très grande majorité de cas des pertes supplémentaires négligeables par rapport à des situations sans apport. La lixiviation totale peut toutefois être déjà élevée y compris en absence d'apport du fait de conditions pédoclimatiques à risque pour des sols à forts reliquats dans le sol et risque de drainage en sortie d'hiver important. Au-delà de cette analyse des risques de lixiviation, il faut noter que seuls quelques sites de l'échantillon essentiellement dans la moitié sud de la France présentent une reprise de l'absorption pendant la deuxième quinzaine de janvier. Sur les autres sites, un apport au 15/01 ne semble pas en adéquation avec la reprise de croissance de la culture. Les interventions à la parcelle en janvier et février semblent en outre causer le tassement du sol voire l'enlèvement du matériel d'épandage si ce dernier exerce des contraintes élevées sur le sol.

Concernant l'analyse de l'effet de différentes pratiques de fractionnement sur les pertes, les simulations ne font ressortir que l'effet du choix du type de fertilisant avec une augmentation importante du risque de volatilisation pour des produits de classe 8 (à plus forte teneur en azote ammoniacal et uréique), épandus en surface. En revanche la répartition des 200 uN totales apportées n'impacte pas significativement les pertes globales par volatilisation sur la durée de la culture mais uniquement sur la répartition des pics de volatilisation au printemps avec une corrélation forte entre la dose apportée et les quantités volatilisées dans les 15 jours suivant cet apport.

Epandage de fertilisants azotés sur culture intermédiaire en interculture courte

Les scénarios de cette situation ont traité des cas d'apports d'engrais minéraux ou organiques autour de la date de semis d'un couvert d'été en interculture courte. Les apports ont donc lieu à la mi-juin ou début juillet. Les résultats de simulations mettent en avant l'effet du choix de la culture et de sa

capacité à absorber rapidement l'azote apporté. La moutarde s'avère plus adaptée que le sorgho pour valoriser des apports de plus de 100 kgN/ha sous forme minérale.

A cette période, les épandages de surface des fertilisants de classes 6 et 8, caractérisées par une proportion importante de l'azote sous forme ammoniacale, présentent des risques importants de volatilisation (jusqu'à un quart de l'azote apporté). Pour les classes 3 à 5, du fait d'une teneur en azote ammoniacal inférieure à 40%, les pertes par volatilisation restent modérées pendant l'été, y compris sur des sols à pH basique. L'apport en profondeur diminue fortement les pertes mais il peut être cependant difficile d'enfouir ces produits s'ils sont apportés 15 jours après semis. Bien qu'aucune différence sur les pertes ne soit constatée pour un produit de classe 3 entre des apports 15 jours avant ou 15 jours après semis, l'apport avant semis peut toutefois faciliter l'enfouissement et diminuer ainsi le risque de pertes par volatilisation.

Les pertes par lixiviation sont très majoritairement négligeables pendant la période estivale mais les pratiques d'épandage en été peuvent impacter les pertes par lixiviation à l'automne suivant. Quelle que soit la classe de fertilisants, les apports de 150 kgN total semblent peu favorables sauf si la culture suivante est capable d'absorber des quantités importantes d'azote dès l'automne.

Epandage de printemps de fertilisants azotés sur cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) et dérobées d'hiver

Les simulations réalisées ont traité des cas d'épandage de fertilisants azotés en sortie d'hiver pouvant, dans le cas des fertilisants organiques, être précédé d'un premier apport en fin d'été précédent lors du semis du couvert. Ce double apport permet d'augmenter la croissance du couvert du fait d'une dose totale apportée plus conséquente et l'efficacité ramenée à la dose s'avère identique aux scénarios d'apports uniques en sortie d'hiver pour les produits organiques à faibles teneurs en azote ammoniacal. En revanche, en cas d'un apport de classe 6 en surface au semis, cette efficacité diminue accompagnée d'une augmentation de la proportion d'azote volatilisé. Les apports au semis facilitent en revanche l'enfouissement du fertilisant, limitant ainsi fortement les pertes par volatilisation.

Pour les apports de fertilisants à minéralisation lente, il faut noter que, quelle que soit la période de l'apport, l'azote reste majoritairement disponible pour la culture suivante et non pour la culture intermédiaire. Les apports de fin d'été sur CIVE ou dérobées d'hiver semblent favorables pour les fertilisants à minéralisation progressive (classes 3 à 5) en particulier lorsqu'ils sont directement enfouis. Certaines conditions pédoclimatiques semblent toutefois à considérer avec plus de précautions comme les pédoclimats favorisant des volumes très importants de drainage hivernal ou une minéralisation basale importante. Dans ces conditions, une absorption faible à modérée par la culture peut mener à des pertes plus conséquentes.

Les apports uniques de sortie d'hiver (15/02 ici) sont plus favorables pour les fertilisants minéraux et de classe 6 sans générer des pertes par lixiviation importantes et avec des pertes par volatilisation plus faibles qu'en fin d'été précédent. Des doses de 100 kgN total ne sont en revanche que très partiellement valorisées par la culture si cette dernière est récoltée dès avril.

Conclusion et limites de l'étude

Pour faire suite à la précédente étude de 2012 sur l'objectivation des périodes recommandées pour l'épandage des fertilisants azotés, cette nouvelle étude a cherché à développer une approche intégrée de l'ensemble des processus dans différents contextes pédoclimatiques, en prenant en compte l'impact des pratiques d'épandage sur l'eau et l'air (essentiellement volatilisation) mais aussi sur la croissance des cultures. Malgré sa provenance majoritairement agricole et son impact

environnemental important même en faibles quantités, le protoxyde d'azote (N_2O) n'a fait l'objet d'une analyse approfondie dans cette étude du fait de l'effet prépondérant des conditions pédoclimatiques sur ce type de perte et d'écart difficilement analysables entre deux périodes d'apport testées.

Au travers de la bibliographie et des simulations réalisées à l'aide la version 9.1 du modèle STICS, l'étude a permis de capitaliser de nouveaux résultats venant compléter les premiers constats et conclusions de 2012. Le champ de l'étude étant vaste et la réalisation contrainte par le temps, il a été nécessaire de sélectionner certaines situations prioritaires à simuler et à analyser, identifiées par les ministères en charge de l'Agriculture et de l'Ecologie avec l'appui de plusieurs experts. Il n'a donc pas été possible de traiter l'ensemble des cultures et pratiques de fertilisation pour lesquelles certaines périodes d'épandage seraient conseillées ou déconseillées. De même, il a été nécessaire de sélectionner un nombre restreint de situations pédoclimatiques, en reprenant les 24 sites et 48 types de sols identifiés et caractérisés en 2012, ce qui ne permet pas de couvrir de manière exhaustive la diversité pédoclimatique du territoire métropolitain. L'étude a toutefois permis dans un premier temps d'élaborer une typologie actualisée des fertilisants azotés, prenant en compte l'évolution des connaissances acquises et des produits utilisés mais aussi le champ élargi des impacts étudiés, à savoir la prise en compte complémentaire des effets sur la qualité de l'air. Dans un second temps, les analyses réalisées à partir des 8 situations simulées avec le modèle STICS et des références scientifiques complémentaires étudiées ont permis d'identifier des pratiques de fertilisation et en particulier des périodes plus favorables à la croissance des cultures et à la limitation des pertes par lixiviation ou volatilisation selon les conditions pédoclimatiques et l'effet d'autres pratiques telles que la date de semis.

Les résultats de simulation mettent en évidence l'effet prépondérant d'autres facteurs par rapport au choix de la période d'apport, comme la dose apportée, le choix du fertilisant ou encore l'enfouissement du fertilisant. Pour la volatilisation par exemple, la possibilité d'enfouir immédiatement le fertilisant azoté permet systématiquement de limiter fortement les émissions quel que soit le moment de l'apport. Il faut cependant noter qu'il n'a été possible de distinguer dans STICS que deux modalités très contrastées : un produit apporté et laissé à la surface du sol et un produit incorporé immédiatement à plus de 5 cm de profondeur. D'autres travaux montrent toutefois que les pertes par volatilisation sont tout de même réduites pour des produits enfouis quelques heures voire 24 h ou 48 h après apport. La période d'apport, en particulier le stade de développement de la culture, peut par contre agir sur la possibilité ou la facilité d'enfouir un fertilisant.

Les simulations faites ont permis d'aborder la question des effets des pratiques de fertilisation sur les pertes azotées à l'échelle d'une parcelle et en considérant la variabilité temporelle mais elles ne traitent pas de l'impact de ces pratiques à l'échelle d'un territoire (selon les surfaces concernées et leur répartition) qui permettrait d'expliquer des phénomènes de concentration ou de dilution des polluants dans l'eau ou dans l'air à cette échelle. L'échantillon de sites-sols de l'étude ne permet pas en outre de cartographier les pratiques les plus favorables mais permet tout de même de prendre en compte une diversité de contextes et leur impact sur l'identification de ces pratiques les plus favorables. En cas d'apports d'automne ou d'hiver, un regard a également été porté sur la portance des sols afin de nuancer la possibilité d'épandre sur ces périodes même si l'analyse de l'absorption et des pertes semblaient satisfaisantes.