



1

Réduire le recours aux engrais minéraux de synthèse, en les utilisant mieux et en valorisant plus les ressources organiques, pour réduire les émissions de N₂O

- A. Réduire la dose d'engrais minéral en ajustant mieux l'objectif de rendement
- B. Mieux substituer l'azote minéral de synthèse par l'azote des produits organiques
- C. Améliorer l'efficacité de l'azote minéral des engrais en modifiant les conditions d'apport

I- Enjeu et principe de l'action

En France, les émissions de N₂O par les sols agricoles sont estimées à 46,7 millions de tonnes d'équivalent CO₂ (MtCO₂e) en 2010, soit 44% des émissions du secteur de l'agriculture. Elles sont en particulier associées à l'usage des engrais azotés de synthèse. Il existe un consensus sur l'importance des excédents d'azote dans les systèmes cultivés en France, sur la faible efficacité globale de l'azote apporté par les engrais minéraux de synthèse, enfin sur le potentiel de bonnes pratiques agricoles à améliorer cette situation.

L'action propose d'étudier les possibilités de réduire les émissions de N₂O en diminuant à la fois les doses de fertilisant de synthèse et les émissions par unité d'azote apporté. Les leviers d'action étudiés sont : une diminution de la dose d'azote minéral apportée en ajustant mieux l'objectif de rendement, une meilleure valorisation des effluents d'élevage et autres déchets organiques se substituant aux engrais minéraux, et une amélioration de

l'efficacité de l'azote apporté obtenue en modifiant les conditions d'apport. Toutes ces techniques n'affectent pas les rendements, et n'impliquent pas de bouleversement des systèmes de production.

Cette réduction de la fertilisation minérale permet en outre des économies d'énergie fossile (donc d'émissions de CO₂ induites en amont de l'exploitation), puisque la fabrication des engrais azotés de synthèse est forte consommatrice d'énergie.

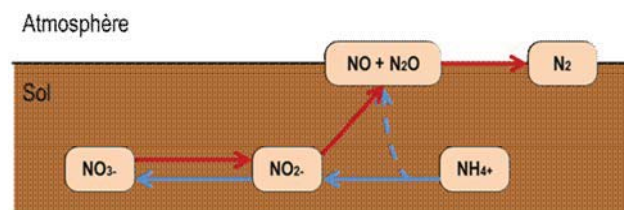
L'action concerne les grandes cultures hors légumineuses. Elle est complémentaire d'autres actions visant également la réduction des apports d'engrais azotés minéraux, par : l'accroissement des surfaces de légumineuses (Action 2), la généralisation des cultures intermédiaires qui limitent les pertes (sous-action de l'Action 4) ou la "désintensification" des prairies les plus fertilisées (sous-action de l'Action 6).

II- Mécanismes et modalités techniques de l'action

• Les émissions de N₂O et la fertilisation azotée

Le niveau des émissions de N₂O (Figure) par les sols est très variable. Il dépend de nombreux facteurs : la nature des produits apportés (fertilisants minéraux ou organiques, formes des engrais minéraux), la nature et l'état du sol (conditions aérobies ou anaérobies), la synchronisation entre la disponibilité de l'azote minéral dans le sol et les capacités d'absorption de la culture. Néanmoins, les analyses globales des flux de N₂O issus des sols montrent qu'en grandes cultures, les quantités d'azote apportées aux sols déterminent l'intensité des émissions de N₂O. Ainsi les méthodologies d'estimation des émissions de N₂O par les sols cultivés, à l'échelle nationale, sont fondées sur la connaissance des apports de fertilisants azotés.

Les fertilisations azotées conduisent à des émissions de N₂O dites "directes", c'est-à-dire des émissions par les sols des parcelles recevant des fertilisants, et à des émissions "indirectes", qui ont lieu depuis d'autres compartiments de l'environnement après un transport (lixiviation de nitrate ou volatilisation puis redéposition d'ammoniac) de l'azote apporté à la parcelle.



Processus biologiques impliqués dans les émissions de N₂O par les sols : nitrification (flèches rouges) globalement observée en conditions aérobies et dénitrification (flèches bleues) en conditions anaérobies

• Les pratiques actuelles de fertilisation azotée

La France est en situation de fort excédent pour l'azote minéral. Les activités agricoles génèrent en moyenne 36 kg de surplus d'azote par hectare et par an, ce qui représente globalement le quart de la fertilisation azotée. Ces valeurs moyennes recouvrent de fortes disparités régionales : les surplus sont en forte augmentation dans les régions Est, et en nette diminution dans les régions d'élevage de l'Ouest où ils demeurent toutefois élevés, les apports d'azote des effluents organiques n'étant que partiellement déduits de la dose d'azote à apporter sous forme minérale.

Malgré trois décennies de recherches sur les pratiques de fertilisation azotée, les études les plus récentes indiquent qu'un des problèmes majeurs reste la faible efficacité de l'azote apporté : moins de la moitié de l'azote fourni par un fertilisant est en moyenne absorbé par la culture, le reste étant perdu par émissions gazeuses (ammoniac, NO_x, N₂O, N₂) ou lixiviation (nitrate), ou consommé par les microorganismes du sol. Mieux synchroniser les apports d'azote avec la demande des plantes permet pourtant d'améliorer la valorisation des fertilisants par la culture. Ces connaissances ont conduit à développer le fractionnement des apports (épandages plus nombreux), qui ne s'est toutefois pas traduit par une réduction des doses totales d'azote. L'utilisation d'outils de calcul ou de pilotage de la fertilisation ne s'accompagne pas, généralement, d'une réduction des apports. Cette situation est notamment due à une surestimation fréquente des objectifs de rendement et donc des besoins en azote de la culture.

• Les sous-actions étudiées

L'action a été explorée à travers 3 leviers déclinés en sous-actions.

- A. Réduire la dose d'azote minéral apportée grâce à une évaluation plus juste des besoins des cultures.

Un meilleur ajustement de la dose d'engrais minéral aux besoins des cultures est obtenu grâce à la fixation d'objectifs de rendement plus réalistes. Cette sous-action s'accompagne d'une utilisation plus importante des outils de pilotage de la fertilisation azotée.

B. Améliorer la valorisation des produits organiques (effluents d'élevage et autres déchets) apportés pour davantage substituer l'azote minéral de synthèse par l'azote des produits organiques et réduire ainsi l'usage des engrais azotés de synthèse. Trois possibilités sont étudiées :

B1. Améliorer la prise en compte de l'azote organique apporté dans le calcul du bilan d'azote.

B2. Améliorer l'efficacité des apports organiques en réduisant les pertes par volatilisation d'ammoniac lors de l'épandage grâce à l'enfouissement systématique des effluents.

B3. Augmenter le volume de déchets recyclés, par la mobilisation de ressources non agricoles supplémentaires (boues de stations d'épuration, déchets agro-industriels ou urbains...).

C. Améliorer l'efficacité d'utilisation par les cultures de l'azote minéral apporté en jouant sur les techniques de fertilisation.

C1. Retarder les dates d'apport de l'engrais au début du printemps sur les cultures d'hiver, en tenant mieux compte des reliquats d'azote minéral en sortie d'hiver.

C2. Utiliser des inhibiteurs de la nitrification associés aux apports d'azote pour obtenir une cinétique de fourniture d'azote par les engrais mieux adaptée aux besoins de la plante.

C3. Enfouir les engrais minéraux dans le sol au semis des cultures de printemps pour limiter les pertes, notamment par volatilisation.

Ces propositions n'entraînent pas de baisse de production. A noter que l'étude complète (voir le rapport) a aussi évalué l'atténuation

permise par la réduction de la fertilisation azotée associée à la réduction des traitements phytosanitaires, s'inscrivant dans la logique du plan national "Ecophyto 2018" ; cette option se traduit par une baisse modérée des rendements. L'étude n'a en revanche pas examiné de scénario de développement de l'agriculture biologique (qui n'utilise aucun engrais de synthèse), car elle induit des baisses de rendement variables mais souvent supérieures au seuil de 10% fixé dans le cahier des charges de l'étude.

L'action s'applique aux grandes cultures, hors légumineuses et prairies temporaires (en rotation avec des cultures annuelles), qui font l'objet d'actions spécifiques dans cette étude (Actions 2 et 6).

• Autres effets de l'action

La modification des pratiques de fertilisation peut affecter le nombre de passages pour l'épandage de l'azote (fractionnement des apports), les techniques d'épandage (engrais solides ou liquides, enfouis ou en surface), les formes d'azote apportées. Ces modifications de pratiques affectent les émissions directes de CO₂ liées à la consommation de gazole des engins agricoles et, en amont, les émissions "induites" liées à la fabrication et aux transports des intrants. Ce poste "amont" est important à considérer dans l'évaluation de l'action, puisque la fabrication et le transport des engrais azotés sont directement liés à la demande en engrais des exploitations agricoles.

En contribuant à la résorption des surplus d'azote, l'action est aussi susceptible de réduire les émissions "aval" induites par la gestion des effets de ces surplus (traitements des eaux, gestion des proliférations d'algues vertes...) ; ces effets ne seront toutefois pas analysés ni comptabilisés.

III- Calculs du potentiel d'atténuation et du coût de l'action

• Les systèmes et sources de données retenus

La connaissance des pratiques actuelles de fertilisation, nécessaire pour proposer des solutions agronomiques adaptées et quantifier leurs effets, provient de l'enquête "Pratiques culturales" 2006 (les résultats de l'enquête 2011 n'étant pas disponibles lors de l'étude). Ces données couvrent les principales grandes cultures de France ; les quelques cultures plus secondaires non renseignées dans l'enquête ne sont donc pas prises en compte. Les données de surfaces sont issues de la Statistique agricole annuelle (SAA) 2010.

Les situations agronomiques, modalités techniques et effets sur la fertilisation minérale des sous-actions sont les suivants.

A. La fixation d'objectifs de rendement plus réalistes pour les différentes grandes cultures (au vu des rendements effectivement réalisés) porte sur une assiette de 11,7 Mha. Elle conduit à une réduction de la dose de 20 kgN/ha en moyenne soit 10 à 15% de la dose totale ; la betterave est exclue, sa fertilisation ayant déjà été diminuée en raison de ses effets négatifs sur la qualité. La situation de référence (données 2006) est une mise en œuvre de la méthode du bilan sur déjà 2/3 des surfaces, et d'un outil de pilotage de la fertilisation sur 7% des surfaces.

B1. La meilleure prise en compte de l'azote organique dans le calcul du bilan se traduit par une économie d'engrais minéraux de 5 kgN/ha en moyenne.

B2. L'enfouissement des apports organiques est réalisé avec un matériel d'épandage à pendillards et broyeurs intégrés. Il permet, grâce à une réduction de la volatilisation d'ammoniac, une économie d'engrais estimée à 7 kgN/ha.

B3. Le "gisement" de produits organiques riches en azote utilisable par l'agriculture est estimé par l'ADEME à environ 180 000 tN/an, soit 2,3 fois les quantités déjà épandues actuellement. Sa valorisation permettrait une économie d'engrais minéraux évaluée à 2 kgN/ha.

Pour B, l'assiette porte sur 12 Mha. Le potentiel d'atténuation n'a été estimé qu'à l'échelle globale de la France, étant donné la diversité et la complexité des situations locales concernant la substitution entre engrais minéraux et produits résiduels organiques. Cette méthode ne devrait pas trop affecter l'estimation du potentiel global d'atténuation, mais elle conduit probablement à sous-estimer les coûts, puisque les transferts de matières vers les exploitations utilisatrices ne sont pas pris en compte.

C1. L'objectif de retarder l'apport d'azote au printemps pour les cultures d'hiver conduit à supprimer le premier apport, et à reporter une partie de la dose sur l'apport suivant. La part des cultures d'hiver (blé et orge, colza) présentant un fort reliquat d'azote en sortie d'hiver a été estimée à partir de données régionales d'analyses de sol. La baisse de dose est évaluée à 15 kgN/ha sur une assiette de 1,8 Mha.

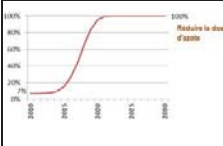
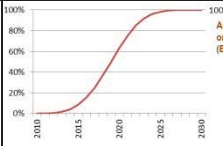

C2. L'option technique étudiée est l'ajout d'un inhibiteur de nitrification (le produit pris comme référence est le DMPP, surtout utilisé en maraîchage pour l'instant). Etant donné qu'une partie de l'azote doit rester rapidement disponible pour la culture, l'inhibiteur n'est associé qu'à une fraction des apports d'azote. La réduction de la dose totale est de 10 kgN/ha sur une assiette de 2,3 Mha.

C3. L'enfouissement localisé de l'engrais est appliqué aux cultures de printemps recevant de l'engrais solide au semis. Il nécessite une modification du matériel d'épandage (ou le recours à une

entreprise). La réduction de la dose totale atteint 12 kgN/ha sur une assiette de 3,7 Mha.

Les sous-actions peuvent être combinées : sur blé tendre d'hiver par ex., associer A, C1 et C2 permet de réduire l'apport d'azote

minéral de 40 kgN/ha environ, soit 25% de la dose moyenne actuelle ; sur maïs, combiner A, B et C3 conduit à une baisse de l'apport d'environ 36 kgN/ha, soit 23% de la dose actuelle.

	Sous-actions	A. Réduire la dose d'azote	B. Mieux valoriser les apports organiques	C. Améliorer l'efficacité de l'azote		
Contenu technique	Situation initiale	Apport d'azote minéral excédentaire, par surestimation des objectifs de rendement	Apports organiques insuffisamment pris en compte dans calcul de fertilisation, et sous-utilisés	Faible efficacité de l'azote minéral apporté (pertes par lixiviation de nitrate et volatilisation d'ammoniac)		
	Gestion de la fertilisation proposée	A. Faire un calcul de bilan azoté avec un objectif de rendement mieux ajusté	B1. Mieux prendre en compte le N organique B2. Réduire les pertes par volatilisation B3. Augmenter le volume de déchets recyclés	C1. Suppression du premier apport d'N	C2. Utiliser des inhibiteurs de nitrification	C3. Enfouir les engrais dans le sol
	Réduction permise d'engrais minéral	19,7 kgN/ha (14,8 à 29,4)	B1 + B2 + B3 : 14,4 kgN/ha (9,8 à 22,2)	15 kgN/ha	10,2 kgN/ha	12,3 kgN/ha (0 à -18,4)
Potentiel d'atténuation unitaire	Emissions* de N ₂ O (directes + indirectes) kgCO ₂ e/ha/an	Moins d'apport azoté et/ou meilleure efficacité				
		108 / 192 + 82 / 30 = 190 / 222	141 / 159	34 / 173	98 / 259	129 / 204
	Emissions* directes de CO ₂ (gazole)	-	-	↘ épandage : 30	↘ épandage : 3	-
	Total émissions* directes + indirectes	190 / 222 142 à 282 / 170 à 315	138 / 156 94 à 214 / 107 à 236	147 / 231	101 / 262	86 / 154 0 à 129 / 47 à 204
	Emissions induites (amont) de CO ₂ et N ₂ O	109 78 à 156	76 52 à 118	87	55	65 0 à 98
Total* kgCO ₂ e/ha/an	299 / 331	214 / 232	234 / 318	156 / 317	151 / 219	
Coût unitaire	Achats €/ha	outil de pilotage : 9,3 (10 €/ha x 93%)	surcoût enfouissement (B2) : 1,5		inhibiteur : 31,2 (0,34 €/kgN)	équipement fertiliseur pour semoir : 2
	Economies €/ha/an	↘ engrais : -18 (-13,5 à -26,8)	↘ engrais : -13,1	↘ engrais : -13,7 -1 épandage : -9	↘ engrais : -9,3 -0,95 épandage : -6,1	↘ engrais : -11,2
	Total €/ha/an	-8,7 (-4,1 à -17,5)	-11,6 (-7,5 à 18,7)	-22,7	15,8	-9,1 (2,1 à -14,7)
Assiette	Assiette théorique	Toutes les grandes cultures fertilisées + maïs ensilage		Grandes cultures d'hiver : 7,8 Mha	Toutes grandes cultures sauf tournesol et riz	Grandes cultures de printemps : 4 Mha
	Critères techniques	sauf betterave	sauf riz	surfaces à fort reliquat de N en sortie d'hiver	inhibiteur associé à 20% de la dose N totale (ou 1 an / 5)	engrais solide au semis
	Ass. Maximale Technique (AMT)	11,7 Mha	12,0 Mha	1,8 Mha	2,3 Mha (320 000 tN/an)	3,7 Mha
Scénario de diffusion	Etat de référence 2010	7%	0%	7%	1,6%	10%
	Scénario de diffusion	Hypoth.: AMT atteinte en 2022	Hypoth.: AMT atteinte en 2028	Hypoth.: AMT atteinte en 2022	Hypoth.: AMT atteinte en 2022	Equipement nécessaire ♦ AMT atteinte en 2030
						

* calcul "CITEPA" / calcul "expert"

Tableau 1

• Estimation du potentiel d'atténuation unitaire

L'atténuation des émissions résulte des effets des sous-actions sur : la dose totale d'azote minéral apporté, les pertes par lixiviation et volatilisation hors de la parcelle, et les émissions amont liées à la fabrication et au transport des engrais de synthèse.

Deux méthodes sont mises en œuvre : le calcul "CITEPA" fondé sur les recommandations GIEC 1996, et un calcul "expert", qui s'en distingue par l'utilisation :

- pour les émissions directes à la parcelle, d'une fonction de type exponentielle, conforme à l'évolution des connaissances au niveau international, et paramétrée à partir de données françaises présentées dans des publications de rang A ;
- pour les émissions indirectes par volatilisation ou lixiviation, des nouvelles valeurs des facteurs d'émission (GIEC 2006), qui ont aussi été modifiées (en se fondant sur la littérature scientifique) pour prendre en compte les effets des sous-actions sur ces émissions ;
- pour les émissions directes et indirectes, de coefficients rendant compte des effets spécifiques des pratiques testées (localisation, usage d'inhibiteurs) issus de la littérature scientifique.

Effet visé :

. La réduction des émissions directes et indirectes de N₂O liée, selon les sous-actions, à la réduction des doses totales de fertilisants azotés, à la réduction des émissions directes de N₂O par unité d'azote apporté, ou à la diminution des pertes par lixiviation ou volatilisation. Les émissions sont estimées selon les deux modes de calcul mentionnés ci-dessus.

Autres effets comptabilisés :

. La réduction des émissions directes de CO₂ dues à la consommation de gazole des engins agricoles, associée à la modification des itinéraires techniques de fertilisation (suppression d'un épandage, enfouissement). Ces émissions sont estimées d'après la base Dia'terre® - Ges'tim.

. La réduction des émissions induites, en amont de l'exploitation, liées à la fabrication et au transport des fertilisants azotés minéraux et des carburants des engins agricoles. Ces émissions sont évaluées à partir des données de la base Dia'terre® - Ges'tim.

IV- Résultats et mise en perspective

• Les résultats

Du point de vue de leur atténuation potentielle, les sous-actions examinées se classent de la manière suivante :

- avec le calcul "CITEPA", ne prenant en compte que la réduction des doses d'azote minéral apporté, les atténuations unitaires par an les plus fortes sont obtenues en ajustant les objectifs de rendement (A), puis en valorisant les apports organiques (B) ou en réalisant un enfouissement localisé de l'engrais (C3). L'atténuation la plus faible est celle permise par la suppression du premier apport sur céréales et le report d'une part de la dose sur une date ultérieure (C1), car le gain d'azote n'est constitué que par l'écart d'efficacité de l'azote entre les deux dates d'apport ;
- avec le calcul "expert", les potentiels d'atténuation sont supérieurs. L'atténuation unitaire la plus forte est obtenue par l'ajout d'inhibiteur de nitrification (C2) ; celles des autres sous-actions sont assez proches. Toutes les sous-actions permettent des réductions des apports d'azote comparables (15 à 20 kgN/ha) et affectent à peu près les mêmes processus.

• Estimation du coût unitaire pour l'agriculteur

Le coût (ou le gain) associé à une sous-action comprend :

- le coût éventuel d'équipements et/ou d'intrants spécifiques : acquisition d'un outil de pilotage de la fertilisation (type Farmstar) pour 93% des surfaces (A), surcoût du matériel d'épandage permettant l'enfouissement des effluents organiques (B2), ou d'un équipement fertiliseur pour semoir (C3) ; achat de l'inhibiteur de nitrification (type DMPP ; C2) ;
- les économies d'engrais azotés de synthèse ;
- la réduction éventuelle du nombre de passages d'engin par suppression d'un apport d'azote (C1 et C2).

• Estimation de l'impact à l'échelle nationale

Assiette maximale technique (AMT)

Les sous-actions A et B concernent *a priori* toute la sole des cultures annuelles fertilisées (donc hors légumineuses). La seule restriction considérée est l'exclusion de la betterave sucrière de l'assiette de A.

Les sous-actions C ne s'appliquent en revanche qu'à certaines situations : le report de l'apport d'azote au printemps (C1) ne concerne que les cultures d'hiver ; l'ajout d'inhibiteur de nitrification (C2) est plafonné à 20% des surfaces maximales possibles pour des raisons d'écotoxicité potentielle ; l'enfouissement localisé de l'engrais (C3) n'est envisagé que sur les cultures de printemps.

Scénario de diffusion de l'action

Pour trois des sous-actions proposées (A, C1 et C2), qui relèvent d'ajustements techniques, l'hypothèse retenue est celle d'une atteinte de l'AMT dès 2022. Pour C3, qui nécessite une modification du matériel d'épandage, la diffusion retenue est plus lente.

La diffusion des sous-actions pourrait être favorisée par le renforcement de la réglementation "directive Nitrates" ou le renchérissement des engrais. Le développement (en cours) d'outils facilitant l'appréciation des apports organiques (composition et quantité) et l'instauration d'une incitation financière sont supposés favoriser respectivement l'adoption de B et de C2.

Les sous-actions se distinguent surtout par leurs assiettes d'application, importantes pour A et B (qui concernent quasiment toutes les grandes cultures), plus restreintes pour les sous-actions relatives à l'efficacité de l'azote.

Pour toutes ces sous-actions, le potentiel d'atténuation lié à la fabrication et au transport des engrais azotés est important, et représente environ 50% de l'atténuation directe.

En résumé, ces sous-actions permettent des atténuations totales (émissions induites comprises) de l'ordre de 0,15 à 0,30 tCO₂e/ha/an avec le mode de calcul "CITEPA", et de 0,18 à 0,33 tCO₂e/ha/an avec le calcul "expert". Ces valeurs sont très proches de celles estimées dans des études similaires à l'étranger.

Quatre des sous-actions ont un coût "négatif", c'est-à-dire représentent un gain pour l'agriculteur. La sous-action C2 est onéreuse, en raison du coût de l'inhibiteur de nitrification.

		Année 2030						Cumul sur la période 2010-2030					
		A	B	C1*	C2*	C3	A+B+C1 +C2+C3 **	A	B	C1*	C2*	C3	
Potentiel d'atténuation (méthode "CITEPA") Sans émissions induites		MtCO ₂ e	2,2	1,7	0,3	0,2	0,3	4,6	32,4	22,3	3,9	3,3	3,8
Potentiel d'atténuation (méthode "expert")	Sans émissions induites	MtCO ₂ e	2,6 2,0 à 3,7	1,9 1,3 à 2,8	0,4 0,1 à 0,7	0,6 0,3 à 0,8	0,6 0,2 à 0,8	6,1 3,9 à 8,8	38 29 à 54	25 17 à 38	6 2 à 10	9 4 à 11	7 2 à 9
	Avec émissions induites	MtCO ₂ e	3,9 3,3 à 5,0	2,8 2,2 à 3,8	0,6 0,3 à 0,8	0,7 0,4 à 0,9	0,8 0,4 à 1,0	8,8 6,6 à 11,5	56 48 à 72	37 30 à 50	8 4 à 12	10 6 à 13	10 5 à 12
Coût total pour les agriculteurs		M€	-101 -205 à -49	-140 -226 à -90	-41 -68 à -12	37 18 à 46	-34 -55 à 8	-280 -536 à -97	-1476 -2977 à -706	-1869 -3024 à -1200	-596 -993 à -178	520 260 à 650	-397 -641 à 92
Coût de la tonne de CO₂e pour l'agriculteur (méthodes "expert", sans émissions induites)		€/CO ₂ e	-39 -56 à -24	-74 -80 à -70	-98	60	-59 -72 à 45	-46 -58 à -32	-	-	-	-	-

M : millions

* les fourchettes (atténuation, coût) portent sur l'assiette atteinte en 2030

** valeurs obtenues en sommant A+B+C1+C2+C3, sans tenir compte des interactions entre sous-actions.

Tableau 2

Potentiel d'atténuation et coûts pour l'ensemble de l'action

Sous hypothèse d'additivité, l'atténuation globale calculée en 2030 pour l'ensemble des 5 sous-actions est de 6,1 MtCO₂e (calcul "expert", hors émissions induites).

L'hypothèse d'additivité est cependant simplificatrice, car la mise en œuvre d'une sous-action diminue la quantité d'azote minéral épanchée, et éventuellement l'assiette, sur lesquelles peuvent porter les autres sous-actions. L'estimation pour l'ensemble de l'action a été recalculée en appliquant successivement, aux assiettes concernées, les sous-actions dans un ordre défini (A puis B puis C1 à C3), en tenant compte des interactions entre les sous-actions. Ce calcul tenant compte des interactions conduit à une atténuation en 2030 de 5,3 MtCO₂e (calcul "expert", hors émissions induites). La prise en compte des interactions modifie dans certains cas légèrement le coût unitaire des sous-actions, et conduit à un coût sur l'AMT en 2030 de -290 M€ (contre -280 M€ pour la somme des coûts des sous-actions).

• La sensibilité des résultats aux hypothèses

L'atténuation unitaire est principalement affectée par les hypothèses concernant les effets des pratiques sur la réduction des quantités d'azote minéral, qui se traduisent par : l'estimation de la réduction de dose permise par l'action, ou un coefficient de volatilisation (gestion des produits organiques, enfouissement localisé de l'azote, nitrification retardée par un inhibiteur), ou un coefficient d'équivalence de l'engrais (Keq) pour la sous-action B. Ainsi par exemple, une augmentation de 10% de la valeur de ce coefficient utilisé pour convertir les quantités d'azote apportées par les produits organiques en quantité d'azote utilisé par une culture accroît l'atténuation unitaire de 13% environ.

Les résultats sont légèrement affectés par les données statistiques utilisées qui, pour les pratiques culturales, datent de 2006 (dernière enquête disponible). Or les pratiques ont évolué depuis, notamment avec la diffusion progressive des principes de la fertilisation raisonnée. Ces évolutions se répercutent principalement sur l'assiette sur laquelle les sous-actions sont mises en œuvre.

Enfin, le potentiel d'adoption par les agriculteurs de certaines sous-actions (l'utilisation d'inhibiteur de nitrification, l'enfouissement localisé de l'engrais) est assez incertain, hors scénario d'incitation

ou de taxation financière. L'atténuation cumulée en 2030 est donc très sensible aux hypothèses de diffusion retenues.

• Les conditions d'une prise en compte de l'action dans l'inventaire national

Comptabilisation des effets

L'utilisation d'un calcul "expert", intégrant les coefficients GIEC 2006 et tenant compte des effets connus des pratiques sur les émissions directes et indirectes, augmente légèrement l'estimation de l'atténuation potentielle pour les sous-actions A et B pour lesquelles seul l'effet de la dose apportée sur les émissions est modifiée par le calcul. L'augmentation de l'atténuation est beaucoup plus élevée pour les sous-actions C1 à C3 pour lesquelles le calcul "CITEPA" ne prend pas en compte les changements liés à l'amélioration de l'efficacité de l'engrais.

Du point de vue des inventaires, la méthode de calcul actuelle (GIEC 1996) qui ne tient compte que des quantités d'azote apportées pour calculer les émissions, rend mal compte des effets des pratiques très intéressantes pour les atténuations (telle que l'usage d'inhibiteurs de nitrification, ou l'apport localisé de l'azote dans le sol). La relation de type exponentielle introduite dans cette étude est basée sur l'analyse des publications françaises. Elle fait écho à des publications récentes internationales mettant en avant cette forme de relation qui pourrait être proposée au GIEC. Une prochaine étape pourrait être, après consolidation des connaissances, la prise en compte de la variabilité des émissions de N₂O en fonction des conditions pédoclimatiques.

Vérifiabilité de la mise en œuvre de l'action

Les données utilisables par le CITEPA pour comptabiliser les sous-actions mises en œuvre pourraient être l'évolution de la livraison des engrais minéraux (statistiques publiées par l'UNIFA). La directive dite "Nitrates" (91/676/CEE), la conditionnalité des aides de la PAC, le régime des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE), les Mesures Agro Environnementales sont autant de dispositifs dans lesquels il est déjà fait obligation aux exploitations de détenir un Plan Prévisionnel de Fertilisation et un Cahier d'Épandage et qui peuvent être contrôlés pour la mise en œuvre sur le terrain. Les modalités techniques d'apport (dates, enfouissement...) sont cependant difficilement vérifiables.

• Les contextes et mesures susceptibles de favoriser le déploiement de l'action

Pour toutes les sous-actions, et en particulier celles demandant assez peu de technicité nouvelle (ajustement de l'apport à l'objectif de rendement, retard d'une date d'apport...), l'augmentation du prix des engrais et/ou des mesures financières visant à réduire la dépendance de l'agriculture aux engrais azotés de synthèse pourraient accélérer la diffusion de l'action.

L'adoption de certaines techniques pourrait être facilitée par l'amélioration d'outils d'aide à la décision (OAD) pour la gestion de l'azote et leur utilisation plus généralisée.

• Les autres effets de l'action

Les sous-actions proposées conduisent à diminuer la contribution des engrais minéraux de synthèse à la nutrition azotée des cultures, et *de facto* à réduire potentiellement les excédents de fertilisation azotée. Elles s'inscrivent donc dans les politiques publiques menées dans le cadre du programme d'action national pour la protection des eaux contre la pollution par le nitrate d'origine agricole, fondé sur la directive "Nitrates". Certaines des sous-actions contribuent également à l'objectif de réduction de la pollution de l'air par volatilisation ammoniacale.

La réduction de consommation d'azote minéral présente enfin un intérêt en termes de balance commerciale, la France important 60% des engrais de synthèse qu'elle utilise, ainsi que la quasi-totalité des matières premières pour les 40% restant.

• Conclusions

Le potentiel de réduction de la fertilisation minérale sans affecter les rendements, est important, et la plupart des sous-actions sont de type "gagnant-gagnant" puisque la réduction de la fertilisation s'accompagne d'une baisse des coûts pour l'agriculteur. Cet effet

devrait s'amplifier avec la hausse des prix des intrants minéraux résultant de l'augmentation attendue du coût de l'énergie. Il existe donc une marge de progrès considérable sans affecter les rendements.

Le potentiel d'atténuation associé à une réduction de la fertilisation minérale des cultures est ici sous-estimé, puisque les calculs ne prennent pas en compte les légumineuses et les prairies (relevant des Actions 2 et 6), ni les cultures légumières, maraîchères et industrielles, ou les cultures pérennes (vignes et vergers). N'est également pas considéré le potentiel d'atténuation lié à une augmentation des surfaces en agriculture biologique (le nouveau plan de développement de l'AB vise le doublement des surfaces d'ici 2017) ; les superficies en grande culture concernées étant limitées (1,6% en 2011), leur extension aurait peu d'impact en terme d'atténuation potentielle des GES.

La gestion de la fertilisation azotée des grandes cultures est techniquement complexe car elle doit tenir compte de la diversité des conditions pédoclimatiques et des incertitudes liées au climat, au fonctionnement biologique des sols et des peuplements, à la disponibilité des formes d'azote. Ces incertitudes conduisent souvent à chercher à minimiser les risques de pertes de rendement en augmentant les doses d'azote. Les pratiques visant à diminuer les risques de pertes (notamment par volatilisation d'ammoniac) doivent donc à tout prix être favorisées. Cette analyse montre aussi que les approches favorables à l'atténuation des GES le sont également à la limitation de la contamination des eaux superficielles et souterraines par le nitrate. Ceci suppose que des techniques encore peu étudiées et/ou pratiquées (l'application localisée de l'engrais dans le sol ou l'utilisation d'inhibiteurs de nitrification par ex.) fassent l'objet d'études plus systématiques en France, pour pouvoir préparer l'accompagnement des agriculteurs. Il existe aussi une marge de progrès considérable sur la mise en œuvre d'outils de pilotage de la fertilisation azotée, encore peu utilisés, et qui montrent leur intérêt dans la réduction de la dose totale d'azote, dès lors que l'objectif de rendement n'est pas surestimé.