

Réduire le recours aux engrais azotés de synthèse : quel potentiel et quel impact sur les émissions de N₂O à l'échelle France ?

Recous S.¹, Jeuffroy M.-H.², Hénault C.³, Bamière L.⁴

¹ INRA, UMR Fractionnement des AgroRessources et Environnement, F-51100 Reims

² INRA, UMR Agronomie INRA-AgroParisTech, F-78850 Thiverval-Grignon

³ INRA, UR Sciences du Sol, F-45075 Orléans

⁴ INRA, UMR Eco-Pub, F-78850 Thiverval-Grignon

Correspondance: sylvie.recous@reims.inra.fr ; marie-hélène.jeuffroy@grignon.inra.fr

Résumé

Afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre issue de l'agriculture française et notamment celles de N₂O, nous avons étudié l'atténuation permise par une réduction de la fertilisation azotée par les engrais de synthèse pour les grandes cultures en France, et estimé l'atténuation totale à l'horizon 2030 ainsi que le coût, pour l'agriculteur, de ces actions par tonne de CO₂e¹ évitée. Les actions techniques ont concerné la mise en œuvre du bilan azoté, l'amélioration de l'efficacité des engrais (dates d'apport, localisation, usage d'inhibiteurs de nitrification), enfin l'augmentation des surfaces en légumineuses dans les rotations de grandes cultures et en prairies. Ces actions permettent une réduction de l'ordre de 15 à 30 kg N /an par hectare concerné par une mesure (constituant l'assiette de la mesure). Le potentiel d'atténuation est donc significatif à l'horizon 2030 (sans remise en cause des niveaux de production). Il concerne des surfaces importantes, particulièrement pour l'amélioration du raisonnement et du pilotage de la fertilisation azotée. La plupart des mesures proposées n'ont que coûts « négatifs » ou faiblement positifs pour l'agriculteur, parce qu'elles ne représentent qu'une économie d'intrants. Leur mise en œuvre nécessiterait des références techniques complémentaires et des changements cohérents dans le système sociotechnique de la part de l'ensemble des acteurs concernés.

Mots-clés : atténuation, engrais organiques, fertilisation azotée, gaz à effet de serre, légumineuses, agriculture

Abstract: Reducing the use of nitrogen fertilizers: how and what potential impact on N₂O emissions from French agriculture?

To reduce the greenhouse gases emissions from French agriculture and particularly those of N₂O, we studied the attenuation that could be allowed by a decrease in the use of mineral nitrogen fertilization on annual crops, in France. We estimated the total attenuation at the 2030 horizon and the cost of these actions for the farmer, expressed per ton of CO₂e² avoided. The technical actions studied concerned a better and larger implementation of the N balance to calculate N fertilizer rate, improving fertilizer efficiency through adapted practices (timing, N placement, nitrification inhibitors), and increasing surfaces grown with legumes in arable crop rotations and grasslands. Our calculations indicate a reduction in the range 15-30 kg N / year per hectare concerned by each measure. The mitigation potential would be important in 2030 (without modifying production levels) because of the large areas concerned -especially for improving and extending rational N fertilization and its management.

¹ Toutes les émissions des émissions de gaz sont exprimées en équivalent d'émission de CO₂, (CO₂e)

² All emissions are expressed in term of equivalent CO₂ emitted (CO₂e)

Most of the proposed measures would have only negative or slightly positive costs, because they only represent a saving of inputs. Implementation still requires additional technical references and consistent changes in the French socio-technical system from all stakeholders.

Keywords: agriculture, greenhouse gases, legumes, organic fertilizers, mitigation, nitrogen fertilization

1. Contexte et objectifs

L'agriculture est la principale source d'émission de N₂O car responsable d'environ 85% des émissions françaises de N₂O hors UTCF (Utilisation des Terres, leur Changement, et la Forêt). 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: 35% sont liés aux émissions directes par les sols agricoles, 28% aux émissions indirectes, 15% aux productions animales et 8,6% à la gestion des déjections (CITEPA, 2012). Elles sont en particulier associées à l'usage des engrais azotés de synthèse. Elles sont généralement estimées par l'application de « facteurs d'émissions » (exprimés en % de la quantité considérée) (méthode TIER 1 des inventaires nationaux).

La France est en situation de fort excédent azoté. Les activités agricoles génèrent en moyenne 32 kg de surplus d'azote par hectare de surface agricole (SAU) et par an, ce qui représente globalement le quart de la fertilisation azotée (Snoubra, 2013). Ces valeurs moyennes recouvrent de fortes disparités régionales, ce surplus variant de 15 à 69 kg N/ha/an. Les études les plus récentes indiquent qu'un des problèmes majeurs à l'origine de ces surplus concerne la faible efficacité d'absorption et d'utilisation de l'azote apporté (Reay *et al.*, 2012): moins de la moitié de l'azote fourni par un fertilisant (minéral ou organique) est, en moyenne, absorbé par la culture, le reste étant soit perdu par émissions gazeuses (ammoniac, NO_x, N₂O, N₂) ou lixiviation (nitrate), soit consommé par les microorganismes du sol. Mieux synchroniser et ajuster les apports d'azote avec la demande des plantes permettrait d'améliorer la valorisation des fertilisants par la culture (Limaux *et al.*, 1999) en diminuant les pertes vers l'environnement (air, eau). Les connaissances acquises au cours des vingt dernières années sur le devenir de l'azote des engrais et la nutrition azotée des cultures (Recous *et al.*, 2014) ont conduit par exemple à promouvoir le fractionnement des apports (épandages plus nombreux), qui ne s'est toutefois pas traduit par une réduction des doses totales d'azote apporté (Agreste, 2010). L'utilisation d'outils de calcul ou de pilotage de la fertilisation - qui était restée limitée (7% en moyenne des surfaces de grandes cultures en 2006) - ne s'est, en plus, pas accompagné d'une réduction des apports (Agreste, 2010). Ainsi il apparaît clairement qu'il existe un potentiel d'atténuation des GES par une diminution de l'usage des fertilisants de synthèse, associée d'une part à un raisonnement rigoureux des apports et d'autre part à la mise en œuvre de techniques susceptibles de diminuer les pertes d'azote en favorisant l'efficacité de l'azote apporté aux cultures. Ces techniques sont souvent résumées ainsi « la bonne dose, la bonne formulation, au bon endroit, au bon moment ».

Les surfaces en légumineuses ont beaucoup varié en France : très faibles au début des années 1970, elles ont atteint un pic en 1993 dépassant 720 000 ha, puis ont chuté, pour passer par un minimum en 2009, avoisinant les 203 000 ha. Ces fluctuations paraissent liées (i) au rapport de prix avec les autres matières premières (blé et tourteau de soja) en concurrence avec les protéagineux pour la fabrication d'aliments du bétail, (ii) aux difficultés techniques rencontrées, notamment en lien avec l'expansion d'*Aphanomyces*, (iii) à la forte sensibilité de ces cultures aux stress abiotiques, ces deux derniers effets se traduisant par une variabilité du rendement plus importante que pour d'autres espèces majeures des systèmes de culture français. Ces variabilités ne sont pas toujours bien expliquées, ce qui rend difficile les progrès dans la conduite de ces cultures et décourage les producteurs. De nombreux autres facteurs touchent l'ensemble des acteurs de la filière des protéagineux, en particulier la question de leurs débouchés (Meynard *et al.*, 2013).

Les soutiens publics (en 2010 par exemple) et l'envolée du prix des engrais azotés de synthèse tendent à être favorables aux légumineuses, mais le manque de visibilité sur ces facteurs n'est pas favorable au maintien de ces cultures dans les systèmes agricoles français. Le principal effet attendu des légumineuses est une baisse des émissions de N_2O résultant de la réduction des besoins (sur la culture elle-même et la culture suivante) en fertilisation minérale et organique. La fixation symbiotique a été considérée jusqu'à récemment comme émettrice de N_2O , au même titre que la fertilisation minérale (le même facteur d'émission était appliqué à l'azote fixé par la légumineuse). Des travaux récents ayant montré que les émissions de N_2O étaient très faibles à nulles pendant le cycle cultural des légumineuses, le GIEC a révisé ses règles de calcul en 2006 en préconisant de ne plus considérer la fixation symbiotique comme émettrice.

2. Les mécanismes d'émission du N_2O des sols

Les sols peuvent fonctionner comme source (mais aussi comme puits) de N_2O , par l'intermédiaire de mécanismes biotiques et abiotiques. De nombreux groupes microbiens sont impliqués dans la production et la consommation de N_2O . La nitrification et la dénitrification biologique sont considérées comme les deux principaux processus source de N_2O . Seule la dernière étape de la dénitrification est connue comme le mécanisme de consommation de ce gaz (Figure 1).

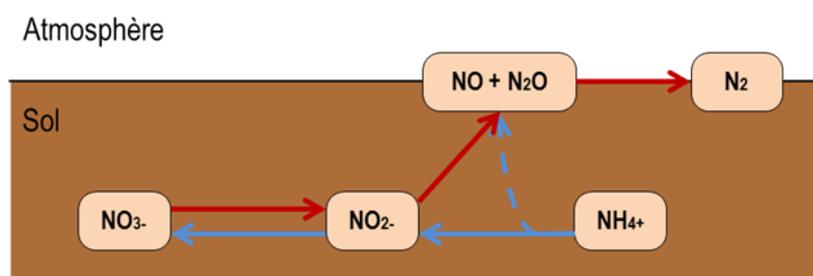


Figure 1 : Représentation schématique et simplifiée des processus biologiques impliqués dans les émissions de N_2O par les sols : la nitrification (flèches bleues) observée généralement en conditions de bonne aération du sol et la dénitrification (flèches rouges) observée généralement en conditions de faible aération du sol.

La dénitrification est la réduction successive des formes oxydées de l'azote, ioniques solubles (nitrate : NO_3^- et nitrite : NO_2^-) puis gazeuses (oxyde nitrique : NO ; oxyde nitreux ou protoxyde d'azote : N_2O) en azote moléculaire (N_2). La dénitrification biologique est une respiration microbienne, où les formes oxydées de l'azote servent d'accepteurs d'électrons, qui s'observe en général en absence d'oxygène. Les composés organiques du sol jouent le rôle de donneurs d'électrons dans cette chaîne de réaction. Conduit jusqu'à son terme (N_2), le processus de dénitrification est positif, contribuant à l'élimination des formes solubles de l'azote (NO_3^- , NO_2^-). En revanche, si le processus de dénitrification est ralenti ou arrêté sur des étapes de réduction des formes gazeuses oxydées intermédiaires de la chaîne (NO , N_2O), ces gaz sont rejetés dans l'atmosphère contribuant à différentes pollutions atmosphériques (effet de serre, destruction de l'ozone stratosphérique...). Le processus de nitrification, classiquement observé en conditions aérobies, est l'oxydation biologique de l'ammonium successivement en nitrite et nitrate. Il peut aussi conduire à la production et la libération de N_2O . Du fait de la coexistence dans les sols de zones aérobies et anaérobies, les processus de nitrification et de dénitrification peuvent fonctionner simultanément.

Les émissions de N_2O par les sols se caractérisent par une variabilité spatiale et temporelle très importante, avec l'existence de points d'émissions très élevées ou « hot spots ». Les émissions de N_2O les plus importantes sont généralement observées soit après apports d'azote par fertilisation minérale ou organique, soit lors de la décomposition des résidus végétaux qui libère de l'azote minéral, en conditions d'humidité importante du sol, créant des conditions d'anaérobiose partielle.

Stehfest et Bouwman (2006) ont compilé et analysé les résultats de 1008 publications présentant des flux de N₂O mesurés dans des sols agricoles. La méta-analyse de cette base de données indique que les facteurs qui influencent significativement l'intensité des émissions de N₂O sont les pratiques agronomiques (fertilisation azotée, type de culture et forme des fertilisants) et les caractéristiques des sols (teneur en carbone organique, pH et texture). Ceci justifie que l'on s'intéresse particulièrement à la fertilisation azotée et aux pratiques qui la concerne, pour réduire ces émissions en sols cultivés. A ces émissions de N₂O liées aux apports d'azote sur les cultures, s'ajoutent des émissions de CO₂ liées à la mise en œuvre de la fertilisation (production, transport, épandage).

3. La contribution de l'expertise de l'INRA sur la réduction de la fertilisation minérale

3.1 Principes et hypothèses mobilisées

Nous avons étudié, dans le cadre de l'étude « Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre » menée par l'INRA (Pellerin *et al.*, 2013), le potentiel d'atténuation de plusieurs pratiques conduisant (i) à réduire les quantités de fertilisants de synthèse apportées et /ou (ii) à réduire les émissions par unité d'azote apporté. Le cahier des charges de l'étude concernait l'étude de pratiques agricoles qui relèvent d'une décision de l'agriculteur, sans remise en cause majeure du système de production ni une baisse des niveaux de production supérieure à 10%, et bien sûr avec une atténuation escomptée, assez significative, en se basant sur des résultats connus issus de la littérature.

Les leviers d'action ont concerné deux grandes catégories : **la fertilisation azotée des cultures** à travers différentes actions que sont le calcul de la dose d'azote, sa meilleure gestion et prise en compte dans les bilans des engrais organiques, l'amélioration de l'efficacité de l'azote apporté ; la réduction de la fertilisation minérale permise par **l'accroissement de la part des légumineuses** dans les rotations culturales et de légumineuses fourragères dans les prairies temporaires. 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. Les solutions proposées dans cette étude ont été raisonnées de manière à ne pas entraîner de baisse de production. L'étude n'a donc 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 (INRA, 2009).

Nous avons quantifié ce potentiel d'atténuation à travers 4 leviers déclinés en sous actions.

- **Réduire la dose d'azote minéral apportée grâce à une évaluation plus juste des besoins des cultures (A).** Un meilleur ajustement de la dose d'engrais minéral aux besoins des cultures est obtenu grâce à la fixation d'objectifs de rendement dits « réalistes », correspondant mieux aux rendements effectivement réalisés. Cette sous-action s'accompagne d'une utilisation plus importante des outils de pilotage de la fertilisation azotée.
- **Améliorer la valorisation des produits organiques (effluents d'élevage et autres déchets) apportés** pour réduire ainsi l'usage des engrais azotés de synthèse (B). Trois possibilités sont étudiées :
 - Améliorer la prise en compte de l'azote organique apporté dans le calcul du bilan d'azote.
 - 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.
 - Augmenter le volume de déchets recyclés, par la mobilisation de ressources non agricoles supplémentaires (boues de stations d'épuration, déchets agro-industriels ou urbains...).

- **Améliorer l'efficacité d'utilisation de l'azote minéral apporté en jouant sur les techniques de fertilisation (C).**
 - 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 (C1).
 - 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 (C2).
 - Enfouir les engrais minéraux dans le sol au semis des cultures de printemps pour limiter les pertes, notamment par volatilisation (C3).
- **Accroître la surface en légumineuses**
 - Introduire davantage de légumineuses à graines dans les rotations de grandes cultures, en remplacement d'autres grandes cultures annuelles (D1). L'hypothèse la plus réaliste de l'introduction de légumineuses se fait pour les 2/3 en remplacement de l'orge (moins rentable que le blé et le colza), pour 1/6 du blé tendre et 1/6 du colza.
 - Augmenter et maintenir des légumineuses dans les prairies temporaires assolées (en remplacement partiel ou total des graminées) et, dans le cas de couverts mixtes, maintenir la légumineuse pendant la durée de vie de la prairie, en limitant la fertilisation azotée, pour éviter que la graminée ne concurrence trop fortement la légumineuse (D2).

Le détail des hypothèses de calcul ne peut être donné dans cet article. Pour plus d'information, il est possible d'accéder à ces informations sur le site de l'expertise, disponible en ligne : <http://institut.inra.fr/Missions/Eclairer-les-decisions/Etudes/Toutes-les-actualites/Etude-Reduction-des-GES-en-agriculture>

3.2 Calculs du potentiel d'atténuation

3.2.1 Les systèmes et sources de données retenus

La connaissance des pratiques actuelles de fertilisation provient de l'enquête "Pratiques culturales" 2006. 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 étudiées, modalités techniques, surfaces concernées et effets sur la fertilisation minérale des différentes sous actions sont résumées dans le Tableau 1.

3.2.2 Le potentiel de réduction de la fertilisation minérale

Le potentiel de réduction des quantités de fertilisant azoté de synthèse a été estimé par sous-action et est présenté dans le tableau 1. La fixation d'objectifs de rendement plus réalistes pour les différentes grandes cultures (A) porte sur une assiette de 11,7 Mha. Elle conduit à une réduction de la dose moyenne de 20 kg N/ha pour les cultures considérées soit 10 à 15% de la dose totale. La situation de référence (données 2006) est une mise en œuvre de la méthode du bilan sur 2/3 des surfaces, et d'un outil de pilotage de la fertilisation sur 7% des surfaces. La meilleure prise en compte de l'azote organique dans le calcul du bilan (B1) se traduit par une économie d'engrais minéraux de 5 kg N/ha en moyenne. L'enfouissement des apports organiques (B2) est supposé réalisé avec un matériel d'épandage à pendillards et broyeurs intégrés permettant l'abattement maximal de la volatilisation d'ammoniac, ce qui permettrait une économie d'engrais estimée à 7 kg N/ha. Le "gisement" de produits organiques riches en azote, utilisable par l'agriculture, est estimé par l'ADEME à environ 180 000 t N/an, soit 2,3 fois les quantités épandues actuellement. Sa valorisation (B3) permettrait une économie d'engrais minéraux évaluée à 2 kg N/ha.

Tableau 1 : Récapitulatif du contenu technique des sous actions de gestion de la fertilisation proposées et des réductions induites en matière de quantités de fertilisant azoté de synthèse. D'après Pellerin *et al.*, 2013.

	Sous-actions	A-Réduire la dose d'azote	B-Mieux valoriser les apports organiques	C-Améliorer l'efficacité de l'azote (C1, C2, C3)	D1-Augmenter les surfaces de légumineuses à graines en grande culture	D-2 Augmenter la part de légumineuses dans les prairies temporaires
	Assiette potentielle (AMT)	11, 7 Mha	12,0 Mha	1,8 – 2,3 – 3,7 Mha	1,27 Mha	3,14 Mha
Contenu technique	Gestion de la fertilisation proposée	Mieux ajuster la dose d'engrais minéral par un calcul de bilan d'azote : -Par le choix d'objectifs de rendement réalistes -En généralisant le pilotage de la fertilisation azotée.	Mieux prendre en compte et utiliser les apports azotés organiques (effluents élevage et déchets) -dans méthode du bilan - réduction de la volatilisation des effluents organiques par enfouissement - augmentation du volume de produits recyclés	Améliorer l'efficacité de l'azote apporté : C1-décaler le 1er apport N sur les cultures d'hiver C2- utiliser des inhibiteurs de nitrification (toutes grandes cultures) C3 – Enfouir les engrais dans le sol, pour les cultures de printemps	Introduction d'une légumineuse à graines se faisant au détriment du blé tendre (1/6 de la surface en légumineuses), de l'orge (2/3) et du colza (1/6) → nouvel assolement France	Augmentation et maintien de la part de légumineuses dans les prairies temporaires
	Réduction permise d'engrais minéral	Surestimation moyenne de 6,6 Qx pour le blé tendre, extrapolé à toutes les grandes cultures Diminution de 19,7 kg N /ha (14,8 à 29,4), → économie d'engrais à l'échelle France : 230 821 t N / an	- Prise en compte dans le bilan : 5 kg N/ha -Réduction volatilisation : - 7 kg N/ha -Accroissement des volumes : - 2 kg N/ha Au total 14,4 kg N/ha (9,8 – 22,2), → économie d'engrais à l'échelle France : 176 257 t N /an.	C1 : 15 kg N/ha C2 : 10,2 kg N/ha C3: 12,3 kg N/ha (0 à - 18,4) → économie d'engrais à l'échelle France : 96 942 t N /an	Suppression sur la légumineuse, réduction de 33 kg N/ha sur la culture suivante → économie d'engrais à l'échelle France : 155 640 t N /an.	Réduction de 35 kg N/ha sur les prairies ayant moins de 20% de légumineuses et de 14 kg N/ha sur les prairies ayant entre 20 et 40% de légumineuses (soit -29 kg N/ha en moyenne) → économie d'engrais de 82 980 t N /an à l'échelle FRANCE

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 (C1). 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 possible est évaluée à 15 kg N/ha sur une assiette de 1,8 Mha. Pour les formes d'azote (C2), l'option technique étudiée est l'ajout d'un inhibiteur de nitrification (le produit pris comme référence est le DMPP®) qui est associé à l'azote minéral, en excluant les dates d'apport tardives dans le cycle cultural, dont on attend généralement une mise à disposition rapide de l'azote pour la plante pour accroître la teneur en protéine des grains. La réduction de la dose totale est de 10 kg N/ha sur une assiette de 2,3 Mha. Enfin l'enfouissement localisé de l'engrais (C3) 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 kg N/ha sur une assiette de 3,7 Mha. A l'échelle de la France, la réduction de la fertilisation azotée, en faisant l'hypothèse d'une adoption de la mesure sur l'ensemble des surfaces concernées, et en tenant compte des interactions entre sous actions, représenterait une réduction de la fertilisation azotée de 635 470 t N par an.

Les réductions de fertilisation azotée permises par l'implantation des légumineuses (D1) sont estimées avec les hypothèses suivantes : absence de fertilisation sur la légumineuse à graines, la fixation d'azote n'étant plus une entrée d'azote considérée comme émettrice de N₂O, et réduction des engrais de 33 kg N/ha sur la culture suivante. Ceci concerne potentiellement 1,27 Mha.

Pour les prairies temporaires (D2) la réduction de la fertilisation est de 35 kg N/ha sur les prairies comportant aujourd'hui moins de 20% de légumineuses et de 14 kg N/ha pour les prairies comprenant entre 20 et 40% de légumineuses. Ceci concerne potentiellement 3,14 Mha. L'introduction de légumineuses à graines modifie les surfaces des autres grandes cultures (réduction de 4,5% des surfaces en blé tendre et colza). Par conséquent, la réduction des émissions de GES résulte à la fois de la suppression de la fertilisation minérale sur une surface accrue de légumineuses à graines et de la réduction de la fertilisation des grandes cultures qui suivent les légumineuses. A l'échelle de la France, la réduction totale a été estimée à 155 640 t N pour les légumineuses à graines et à 82 980 t N par an pour les prairies. De ces valeurs nationales, sont ensuite déduites des valeurs par ha de légumineuse implantée (Tableau 1). L'introduction de légumineuses réduit aussi l'assiette (ha de blé tendre et de colza) sur laquelle portent les sous actions A, B ou C, de l'ordre de 4,5%, ce qui conduit finalement à une réduction de la fertilisation azotée liée aux mesures A à C de 628 101 t N/an (par rapport aux 635 470 t N/ha mentionnés plus haut).

3.2.3 Les autres effets des actions, sur les émissions de GES

La modification des pratiques de fertilisation et l'augmentation des légumineuses dans les assolements affectent le nombre de passages pour l'épandage de l'azote (réduction du nombre d'apports), les techniques d'épandage (engrais solides ou liquides, enfouis ou en surface), les formes d'azote apportées, le nombre de passages de tracteur pour d'autres opérations techniques (ex. suppression possible du labour avant les cultures qui suivent les légumineuses), la réduction de l'usage des pesticides.

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 au transport 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. Nous n'avons pas détaillé ces calculs ici (voir étude complète pour plus d'information) mais la prise en compte de ces émissions augmente de 50 % le potentiel d'atténuation directe (voir chiffres ci-dessous sur les émissions directes et totales).

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 n'ont pas été analysés ni comptabilisés dans cette étude.

3.3 Le potentiel d'atténuation unitaire et global

Pour toutes les émissions directes et indirectes, les calculs ont été effectués avec les facteurs d'émissions définis pour le GIEC en 1996 et utilisés dans l'inventaire national des émissions de 2010 (méthode Citepa2010), puis avec les nouveaux paramètres retenus par le GIEC en 2006, et, pour certains processus non pris en compte par le GIEC, avec des paramètres issus de la littérature (méthode « expert »). Les émissions sont équivalents à 9,61 kg CO₂e/kg N pour les émissions directes (intervenant sur la parcelle) et indirectes (intervenant après lixiviation ou volatilisation). Les émissions sont équivalentes à 15 kg CO₂e/kg N si l'on tient compte des émissions directes + indirectes + induites (incluant l'étape de fabrication et de transport des engrais). Pour les légumineuses, les émissions liées à la fixation symbiotique sont considérées comme nulles depuis 2006. Les effets sont donc liés aux changements dans la fertilisation minérale uniquement. Le calcul d'atténuation unitaire (exprimé en équivalent CO₂ pour toutes les émissions) a tout d'abord été calculé, permettant d'évaluer le potentiel par hectare concerné par la mesure (Tableau 2).

Le calcul d'atténuation potentielle globale a ensuite été réalisé en tenant compte de la surface concernée à l'échelle France (AMT ou assiette maximale technique, en hectare)³. Enfin l'atténuation cumulée sur la période 2010-2030 a été calculée en tenant compte d'une cinétique d'adoption probable de la mesure par les agriculteurs. Ces calculs sont présentés de manière synthétique Tableau 2.

Tableau 2 : Synthèse des potentiels d'atténuation (*Mt CO₂e par hectare*) à l'échelle France, obtenues en 2030 et des atténuations cumulées (2010-2030) sous condition de scénario d'adoption, et coût de la tonne de CO₂e évitée pour l'agriculteur (€/ tCO₂e).

Calcul Citepa 2010 et Calcul « expert », pour les émissions directes + indirectes, sans ou avec émissions induites (D'après Pellerin *et al.*, 2013). * Les sous actions C1 et C2 ont peu ou pas d'incertitude sur leur potentiel d'émission unitaire calculé avec la méthode CITEPA.

		Année 2030							Cumul sur période 2010-2030						
		A	B	C1*	C2*	C3	D1	D2	A	B	C1*	C2*	C3	D1	D2
Potentiel d'atténuation (méthode "CITEPA2010), Sans émissions induites		2,2	1,7	0,3	0,2	0,3	0,3	0,8	32,4	22,3	3,9	3,3	3,8	7,6	11,6
Potentiel d'atténuation (méthode "expert")	Sans émissions induites	2,6	1,9	0,4	0,6	0,6	0,9	0,5	38	25	6	9	7	15	7
	Avec émissions induites	2,0 à 3,7	1,3 à 2,8	0,1 à 0,7	0,3 à 0,8	0,2 à 0,8	0,3 à 1,4	0,4 à 1,0	29 à 54	17 à 38	2 à 10	4 à 11	2 à 9	5 à 24	6 à 14
Coût de la tonne de CO ₂ e pour l'agriculteur (méthode "expert", sans émissions induites)		-39	-74	-98	60	-59	19	-185	-	-	-	-	-	-	-
		-56 à -24	-80 à -70			-72 à 45	18 à 19	-189 à -169							

Du point de vue de leur atténuation potentielle (par hectare concerné) et de leur atténuation totale cumulée (à l'horizon 2030), les sous actions examinées se classent de la manière suivante :

Avec le calcul Citepa 2010, prenant en compte uniquement la réduction des doses d'azote minéral apporté, l'atténuation la plus forte est obtenue en modifiant les objectifs de rendements (A) puis en gérant mieux la substitution des apports organiques (B). L'atténuation la plus faible est obtenue par la sous-action C1, qui concerne la suppression du premier apport sur céréales, et le report de la dose sur une date ultérieure, 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 potentielle la plus forte est obtenue par la sous-action C2 basée sur l'ajout d'un inhibiteur de nitrification avec les apports d'azote, les autres sous actions étant assez équivalentes dans leur potentiel d'atténuation unitaire. Au final, elles permettent un abattement des quantités d'azote /hectare relativement équivalent (15 à 20 kg N/ha) et affectent à peu près les mêmes processus, ce qui explique ces résultats. Ce qui distingue ces sous actions, c'est surtout leur assiette potentielle d'application, avec une assiette importante pour les sous actions A et B (qui concernent quasiment toutes les grandes cultures) alors que les sous actions relatives à l'efficacité de l'azote concernent, pour des raisons propres à chaque sous-action, des surfaces plus restreintes. Ceci conduit à des potentiels d'atténuation beaucoup plus importants pour les sous actions A et B (Tableau 2).

³ Pour l'action concernant les légumineuses, l'accroissement de leur surface conduit à modifier l'assolement des autres cultures. Le calcul inverse a été mené : d'abord recalculer les surfaces impactées par l'action à l'échelle France, puis calculer le potentiel unitaire par hectare de légumineuse.

Pour les légumineuses, la comparaison des atténuations des sous actions D1 et D2, comparées aux actions A, B et C mais aussi avec des résultats d'autres études « atténuation de GES » réalisées dans le monde (Moran *et al.*, 2008 ; Eagle *et al.*, 2012), montre que les atténuations unitaires calculées ici se situent dans la gamme basse des estimations pour la prairie, et dans la gamme moyenne pour les légumineuses à graines. Ceci s'explique par le fait que l'estimation d'accroissement des surfaces en légumineuses à graines (4,5% des surfaces arables) est faible par rapport au taux de présence des légumineuses dans d'autres pays (13% des terres arables au Canada, 32% aux Etats-Unis). Cette hypothèse faible a été privilégiée pour son réalisme. Des hypothèses de taux d'incorporation plus élevé des légumineuses dans les assolements français sont tout à fait faisables sur le plan technique, mais butent sur des freins sociaux majeurs, qui nous ont conduits à ne pas les retenir.

Pour ces deux catégories de levier d'action, les calculs que nous avons effectués sont évidemment sensibles à différents facteurs. Pour la fertilisation azotée, l'atténuation unitaire est principalement sensible aux hypothèses concernant les réductions possibles de la dose d'azote associées aux pratiques examinées (sous actions A et C) et les coefficients de volatilisation des produits organiques et les coefficients d'équivalence de l'engrais (K_{eq}) utilisés pour traduire l'amélioration de la gestion des engrais organiques en réduction de la quantité d'engrais minéral. Enfin le potentiel d'adoption de certaines pratiques par les agriculteurs est incertain, hors scénario d'incitation ou de taxation financière. Les valeurs moyennes que nous avons utilisées pour la réduction des doses d'azote ne font pas l'objet de consensus car les résultats agronomiques disponibles sont assez variables selon les essais ou selon les conditions, c'est pourquoi nous les avons assorties de valeurs minimales et maximales, sur la base des données trouvées dans la littérature technique ou scientifique, et ces valeurs vont varier de 25 à 50 % les valeurs moyennes calculées. Au total pour ces sous actions sous hypothèse d'additivité, l'atténuation globale calculée en 2030 serait, avec le calcul « expert » de 6,1 MtCO_{2e} (3,9 à 8,8) sans émissions induites et de 8,8 Mt CO_{2e} (6,1 à 11,5) en tenant compte des émissions induites. Mais la mise en œuvre d'une sous action diminue la quantité d'azote minéral épandue, et éventuellement l'assiette sur lesquelles peuvent porter les autres sous action. En appliquant successivement les sous actions dans un ordre défini (A puis B puis C1 à C3 selon les cas), le calcul conduit à une atténuation en 2030 de 5,3 MtCO_{2e} (calcul expert sans émissions induites) soit une diminution de 15% de l'atténuation cumulée.

Pour les légumineuses, les résultats sont sensibles aux hypothèses retenues pour les substitutions de culture (remplacement en différentes proportions du colza, de l'orge et du blé), et les coûts le sont encore plus. Les substitutions effectivement réalisées par les agriculteurs dépendront fortement des prix relatifs entre cultures. Les hypothèses de calcul de l'AMT pèsent également fortement dans les calculs d'atténuation totale, à l'échelle France pour les légumineuses à graines, mais aussi pour les prairies.

Enfin les données présentées montrent que les atténuations potentielles, et donc totales, dépendent aussi beaucoup de la méthode de calcul employées. Jusqu'à récemment les calculs d'émission selon la méthode officielle du GIEC (Calcul Citepa 2010) considéraient la fixation symbiotique comme une source potentielle d'émissions de N₂O au même titre que la fertilisation azotée. Cette méthode utilise un facteur d'émission appliqué uniquement aux doses d'azote apporté, et rend donc mal compte des effets des pratiques très intéressantes pour les atténuations, telles que l'enfouissement des engrais, l'apport localisé, l'ajoute d'inhibiteur de nitrification, le choix de formes et formulations d'engrais moins émettrices.

3.4 Coût pour l'agriculteur de la tonne de CO₂ évitée

L'estimation du coût unitaire (gain quand celui-ci est négatif) pour l'agriculteur comprend, pour les grandes cultures :

- 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 et de protection sanitaire (A, D1) ainsi que celles permises par la suppression du labour après la culture de légumineuse (D1) ;
- la réduction éventuelle du nombre de passages d'engin par suppression d'un apport d'azote (C1, C2)
- les gains de marge brute réalisés sur la culture suivante, liés aux modifications d'assolement induites par l'introduction d'une plus grande surface de légumineuses à graines (D1)

Pour les prairies (D2), les seuls coûts correspondent à la réduction de la fertilisation (économie d'engrais et de son épandage), car le rendement n'est pas affecté par la modification de la composition de la prairie.

Les calculs de ces coûts donnent des résultats assez différents : une série de sous actions sont à coûts « négatifs » c'est-à-dire que leur mise en œuvre apporterait un gain net pour l'agriculteur (Tableau 2) : il s'agit des sous actions A, B, C1 et C3 (-39 à -98 €/ha) et D2 la plus fortement négative (-185 € / ha prairie). Seul l'usage d'inhibiteurs de nitrification, associés à la fertilisation minérale représenterait un manque à gagner pour l'agriculteur (+60 € / ha) en raison du surcoût de l'inhibiteur. Dans la gamme des actions étudiées dans l'expertise menée par l'Inra (Pellerin *et al.*, 2013), les actions présentées ici se situent donc pour la plupart dans les actions à coût négatif, et correspondent globalement à des pratiques relevant d'ajustements techniques avec économie d'intrants, et sans pertes de production. La non prise en compte des coûts de transaction privée, correspondant au temps passé pour la mise en œuvre de la mesure (recherche d'informations, formation, etc.), dans les résultats présentés ici (Tableau 2) , mais aussi le manque de conseil technique pourraient expliquer, en partie, les freins à l'adoption de mesures qui apparaissent pourtant générer des gains financiers pour l'agriculteur (Pellerin *et al.*, 2013).

Conclusion

Conformément au cahier des charges de l'étude, les actions et sous actions envisagées dans cette étude sont compatibles avec le maintien d'une agriculture à volume de production équivalent. Certaines actions, encore peu acceptée socialement ou nécessitant un effort de recherche important, n'ont pas été instruites. L'estimation de l'atténuation globale peut donc être considérée comme une estimation prudente du potentiel d'atténuation du secteur agricole, même s'il subsiste des incertitudes importantes sur le potentiel unitaire et/ou l'assiette de la plupart des actions. Certaines estimations sont en effet associées à une variabilité, parfois importante. En comparaison avec les autres leviers analysés dans cette étude, ceux concernant la gestion de l'azote représentent la majeure partie du potentiel d'atténuation, et ce résultat est renforcé en tenant compte des émissions induites, dues notamment à la fabrication des engrais de synthèse. Ces incertitudes appellent un besoin de références techniques complémentaires, notamment sur des leviers à fort potentiel d'atténuation. Soulignons à ce titre, les objectifs et la démarche de travail mise en œuvre par l'Unité Mixte Technologique (UMT) N₂O à Grignon, associant le CETIOM et l'INRA avec d'autres partenaires⁴ qui vise (i) à fiabiliser la connaissance et la prédiction des émissions de N₂O par les systèmes de grande culture grâce à la constitution d'un réseau d'expérimentations et de collecte de données, (ii) à étudier les itinéraires techniques susceptibles de modifier les émissions de N₂O, enfin (iii) à être une structure reconnue en matière de référence pour les émissions de N₂O, afin d'élaborer des facteurs d'émission basés sur des

⁴ <http://www.cetiom.fr/dossiers-phares/demarche-de-progres-du-biodiesel/gaz-a-effet-de-serre/cetiom-et-n2o/>

références « locales » (approche « TIER 2 »). Un enjeu important serait de pouvoir tenir compte des facteurs d'émissions des pratiques que nous avons étudiées ici, comme l'effet des inhibiteurs ou de la localisation de l'azote, ce qui n'est pas le cas actuellement avec des facteurs d'émission uniquement basés sur les quantités d'azote apportées et qui ne favorisent pas l'adoption de ces pratiques.

S'il est clair que des atténuations potentielles substantielles pourraient être atteintes par une modification des pratiques agricoles en matière d'utilisation des engrais azotés de synthèse, sans conséquence majeure sur les volumes de récolte produits, il est évident que de tels changements ne sont pas aisés et nécessitent des changements cohérents dans le système sociotechnique français, de la part de l'ensemble des acteurs concernés (acteurs des filières de transformation, acteurs de la collecte, acteurs du conseil, acteurs de la fourniture d'intrants). Même si les conditions de ces évolutions sont difficilement appréciables, elles devront très probablement s'appuyer sur des incitations financières, plus ou moins importantes selon les actions techniques à faire évoluer, et selon la cohérence avec d'autres contraintes ou objectifs affectant ces mêmes leviers techniques.

L'étude portait exclusivement sur les conséquences des leviers techniques choisis sur les émissions de GES. Or, la mise en œuvre de ces leviers techniques aura, sans nul doute, d'autres conséquences qu'il serait nécessaire d'évaluer par une approche multicritère. On peut notamment citer : la contribution à la réduction des pollutions nitriques, la contribution à la réduction de la pollution de l'air par volatilisation ammoniacale, la réduction de la consommation d'énergie fossile nécessaire pour la fabrication des engrais de synthèse, l'intérêt pour la balance commerciale française (beaucoup d'importations d'engrais minéraux). L'accroissement des légumineuses dans les systèmes de culture est favorable à la réduction de l'usage des produits phytosanitaires (par la diversification des cultures), à l'accroissement de la biodiversité (pollinisateurs notamment), à la réduction de la consommation d'énergie fossile, en général à un étalement des travaux dans l'exploitation agricole. Globalement, même sans estimation quantifiée, il apparaît que les autres effets de la mise en œuvre des techniques présentées ici sont plutôt favorables, ce qui devrait faciliter leur acceptabilité.

Références bibliographiques

AGRESTE, 2010. Pratiques culturales 2006. Les dossiers n°8, Juillet 2010.

CITEPA, 2012. Rapport national d'inventaire pour la France au titre de la convention cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et du protocole de Kyoto. 1364 p.

Eagle A., Olander L., Henry L.R., Haugen-Kozyra K., Millar N., Robertson G.P., 2012. Greenhouse gas Mitigation Potential of Agricultural Land Management in the United States: A synthesis of the Literature. report NIR 10-04, Third Edition. Durham, NC: Nicholas Institute for Environmental Policy Solutions, Duke University, 76 pages.

INRA, 2009. Écophyto R&D : Vers des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires. Tome II : analyse comparative de différents systèmes en grandes cultures JP Butault, CA Dedryver, C Gary, L Guichard, F Jacquet, JM Meynard, P Nicot, M Pitrat, R Reau, B Sauphanor, I Savini et T Volay (éditeurs)

Limaux F., Recous S., Meynard J.-M., Gückert A. (1999) Relationship between rate of crop growth at date of fertiliser-N application and fate of fertiliser-N applied to winter wheat. *Plant and Soil* 214, 49-59.

Meynard J.M., Messéan A., Charlier F., Charrier M., Fares M., Le Bail M., Magrini M.B., Savini I., 2013. Freins et leviers à la diversification des cultures. Etude au niveau des exploitations agricoles et des filières. Synthèse du rapport d'étude, INRA, 52 pages.

Moran D., MacLeod M., Wall E., Eory V., Pajot G., Matthews R., McVittie A., Barnes A., Rees B., Moxey A., Williams A., Smith P., 2008. UK marginal cost curves for the agriculture, forestry, land-use and land-use change sector out to 2022 and to provide scenario analysis for possible abatement options out to 2050 – RMP4950 Report to The Committee on Climate Change & Defra.

Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H., Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 92 p.

Reay D.S., Davidson E.A., Smith K.A., Smith P., Melillo J.M., Dentene F., Crutzen P.J., 2012. Global agriculture and nitrous oxide emissions. *Nature climate change* 2, 410-416.

Recous S., Machet, J-M, Jeuffroy, M-H, 2014. Les connaissances nouvelles sur le cycle de l'azote. In : Pellerin S., Butler F., Van Laethem C. (Eds.) *Fertilisation et Environnement: enjeux et perspectives pour l'aide à la décision*. QUAE-ACTA (Paris) pp 163-181.

Snoubra B., 2013. Les surplus d'azote et les gaz à effet de serre de l'activité agricole en France métropolitaine en 2010. *Chiffres & statistiques n° 448*, Commissariat général au développement durable.

Stehfest E., Bouwman L., 2006. N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 74, 207-228.