

Partie II

Analyse des dix actions techniques

Action 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 associées

Auteurs

Sylvie Recous (INRA-EA)
Catherine Hénault (INRA-EA)
Laure Bamière (INRA-SAE2)

Appui scientifique interne

Caroline Colnenne-David (INRA-EA)
Marie-Hélène Jeuffroy (INRA-EA)

Extraction et traitement de données

Nathalie Delame (INRA-SAE2)
Jean-Baptiste Duclos (INRA-SAE2)
Lénaïc Pardon (INRA-DEPE)

Relecteur scientifique externe

Thierry Morvan (INRA-EA)
Jean-Marie Machet (INRA-EA)

Relecteur technique externe

Jean-Pierre Cohan (Arvalis – Institut du Végétal)

Nous remercions les personnes qui nous ont consacré du temps en répondant à nos questions, en nous confiant des données et des publications : Philippe Eveillard (UNIFA), Nathalie Damay et Caroline Le Roux (LDAR), Marc Hervé (Eurochem), Michel Cariolle (ITB), M. Lambert (Yara), C. Rocca (InVivo), Françoise Vertes, Sabine Houot, (INRA).

1. Introduction : cadrage et description succincte de l'action

L'action concerne la fertilisation azotée minérale des grandes cultures et les effets de pratiques de gestion sur les émissions de N₂O, soit en diminuant les émissions directes ou indirectes d'oxydes d'azote par unité d'azote apporté, soit en diminuant les doses de fertilisant de synthèse apportées grâce à une amélioration de l'efficacité de l'azote. Les sous-actions étudiées s'inscrivent dans le cadre d'un consensus sur les 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 ("la bonne dose, la bonne forme, au bon moment, au bon endroit"). Cette action s'entend sans diminution notable de la production agricole et sans bouleversement des systèmes de production.

D'autres actions de l'étude conduisent aussi à la diminution des apports de fertilisants azotés de synthèse (notamment l'accroissement des surfaces de légumineuses, l'introduction de cultures intermédiaires, le développement de l'agroforesterie, la désintensification des prairies, etc.). Elles ne seront donc pas mentionnées ici, puisqu'elles font l'objet, chacune, d'une évaluation détaillée. L'action, présentée ici, traite spécifiquement des effets liés aux pratiques de fertilisation azotée, néanmoins elle n'est pas exhaustive et n'a pas abordé toutes les possibilités techniques de modulation de la fertilisation azotée. Nous avons retenu celles qui nous semblaient être les principales possibilités d'amélioration, soit au regard de l'importance de l'assiette concernée (ex. céréales à l'échelle France), soit au regard du potentiel d'atténuation unitaire et des développements scientifiques récents (ex. inhibiteurs de nitrification).

Nous avons organisé cette action en trois volets, qui sont fondés sur :

- une diminution possible de la dose d'azote minéral apportée par une généralisation de la démarche du bilan d'azote minéral, et de la réduction des intrants dans les systèmes de culture ;
- une substitution meilleure par les produits résiduels organiques (effluents d'élevage et déchets organiques) ;
- une amélioration de l'efficacité de l'azote minéral apporté par certaines pratiques culturales (dates d'apport, formes d'azote, placement de l'azote).

Il est à noter que ces différentes sous-actions conduisent généralement toutes à une diminution de la dose d'azote minéral apportée, mais nous avons choisi cette structuration parce que les leviers d'action procèdent de logiques différentes.

Nous avons décrit les potentiels d'atténuation et les effets sur les coûts pour les principales grandes cultures à l'échelle de la ferme France, pour lesquelles à la fois un ensemble de données statistiques et des références techniques étaient disponibles. Ceci nous permet la comparaison des différentes sous-actions quant à l'importance de leur potentiel d'atténuation et de leur coût, et dans certains cas, leur combinaison. La question de la fertilisation des prairies est abordée par l'action 6.

2. Description de l'action

2.a. Mécanismes en jeu et émissions de GES associées

Plusieurs mécanismes peuvent être à l'origine d'une réduction des émissions de N₂O et de CO₂ liés à la fertilisation azotée des cultures par une modification des pratiques culturales. Nous décrivons ces mécanismes, en les séparant en effets directs et indirects se produisant à l'échelle de l'exploitation agricole et en amont de l'exploitation.

Les effets liés à la gestion sur l'exploitation

Les méta-analyses conduites à partir de publications présentant des mesures de flux de N₂O par les sols font ressortir qu'en grandes cultures, les quantités d'azote apporté dans les sols déterminent l'intensité des émissions de N₂O. Ainsi, les méthodologies de base pour réaliser les inventaires d'émission de N₂O par les sols cultivés sont basées sur la connaissance des apports de fertilisants azotés dans les sols. La méthodologie proposée par l'IPCC calcule à la fois des émissions directes de N₂O par les sols, c'est-à-dire celles qui ont lieu directement dans les parcelles recevant des fertilisants, et des émissions indirectes qui ont lieu dans d'autres compartiments de l'environnement après un transport (lixiviation ou volatilisation et redéposition) de l'azote apporté à la parcelle.

Dans cette action, nous nous attacherons à mettre en place des pratiques permettant de diminuer l'accumulation de nitrate dans les sols, soit par l'apport de doses plus faibles d'engrais, soit en ralentissant son accumulation (forme d'azote nécessitant une hydrolyse ou une nitrification, par exemple) ou en accélérant sa consommation (bonne synchronisation avec l'absorption d'azote par les cultures, par exemple), ces deux dernières approches permettant ainsi d'améliorer l'efficacité des engrais apportés vis-à-vis de la croissance des plantes.

Nous attendons de ces pratiques qu'elles permettent de diminuer les émissions directes de N₂O par une diminution des quantités apportées et/ou par une meilleure efficacité de ces apports, ainsi que les émissions indirectes qui sont elles aussi liées aux quantités d'azote apportées ainsi qu'à l'efficacité des apports.

Les autres effets

La modification des pratiques culturales peut aussi affecter le nombre d'apports d'engrais, c'est-à-dire le nombre de passages pour l'épandage de l'azote (fractionnement), les techniques d'épandage (solides, liquides, enfouis, en surface, etc.), les formes (physiques et chimiques) d'azote apportées. Ces modifications affectent des émissions directes liées à la consommation d'énergie des engins agricoles, et en amont ces pratiques influencent les émissions liées à la fabrication et aux transports des engrais azotés. **Ce poste "amont" nous semble important à considérer dans l'évaluation de cette 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 considéré les émissions "aval" pouvant être affectées par les mesures liées à la résorption des surplus d'azote (traitements des eaux, eutrophisation des milieux côtiers, etc.) et qui pourraient être modifiées suite à cette action.

2.b. Sous-actions et éventuelles options techniques instruites dans la fiche

Contexte

Les engrais azotés de synthèse représentent un poste énergétique important de l'agriculture française. La France est le 7^e consommateur d'engrais minéraux dans le monde, avec environ 3,5 millions de tonnes d'éléments fertilisants consommés chaque année, représentant environ 2% du marché mondial. L'agriculture française ne dépend pas uniquement de la fertilisation minérale, puisque celle-ci ne représente que 45% de la fertilisation totale, contre 55% pour les fertilisants organiques. La France dispose encore d'une industrie de production d'engrais importante, et la part des engrais non importés représente, en 2012, 40% du marché français d'après l'Union des Industries de la Fertilisation (UNIFA). Mais ces industries doivent importer la quasi-totalité des matières premières nécessaires. Le développement d'unités industrielles de production dans les pays disposant des matières premières de base et de plus faibles coûts de main d'œuvre a pour conséquence l'augmentation des importations en provenance des pays tiers.

Il y a eu augmentation de la fertilisation azotée minérale jusqu'en 2002 environ, puis une diminution progressive de l'apport d'engrais azotés à l'échelle France équivalente depuis 20 ans. Les livraisons d'engrais étaient en moyenne de 94,4 kgN/ha de surface fertilisable en 1990-91-92 et de 83,1 kgN/ha en 2011-12-13, soit une baisse de 12%, plus marquée sur betterave ou prairies que sur céréales (UNIFA 2013).

A partir des années 1970, les approches de fertilisation raisonnée se sont développées en France, et notamment la "méthode du bilan d'azote minéral" qui consiste à déterminer les besoins en azote de la culture et l'offre du sol, et à équilibrer le bilan par la fertilisation minérale (Hébert, 1959). Largement reprise sous différentes formes, elle est devenue un cadre conceptuel de référence (COMIFER, 2012). Cependant, l'enquête "Pratiques culturales" en 2006 révélait une appropriation encore limitée des éléments nécessaires à la mise en œuvre de ce bilan (estimation ou mesures de reliquats d'azote, prise en compte d'un effet "précédent", fixation d'un objectif de rendement réaliste) et seulement 7% des surfaces faisaient l'objet d'un pilotage de la fertilisation azotée (Agreste, 2010).

Malgré l'importance des recherches menées au cours des 30 dernières années sur les pratiques de fertilisation azotée, les études les plus récentes relatives aux impacts environnementaux de la gestion de l'azote indiquent qu'un des problèmes majeurs reste la faible efficacité de l'azote apporté, qui conduit à apporter des quantités considérables d'azote pour assurer la production agricole. Moins de la moitié de l'azote apporté par un fertilisant est en moyenne absorbé par la culture fertilisée (Reay et al., 2012). Cette faible efficacité provient notamment du fait que l'azote apporté est soumis à un certain nombre de processus biologiques et physiques, qui interviennent très tôt après les apports d'azote, et qui sont en forte compétition avec le peuplement végétal (pertes gazeuses, organisation microbienne, transport et lixiviation). Pourtant, plus la disponibilité de l'azote est synchronisée avec la demande potentielle en azote de la culture, et plus le recouvrement de cet azote apporté par la culture est important (Recous et Machet, 1999). Ces connaissances sont passées progressivement dans la pratique, ce qui s'est traduit par une augmentation du fractionnement des apports (augmentation du nombre d'épandages), mais ceci n'a pas conduit à réduire les doses totales d'azote apporté (Agreste, 2010).

La France est en situation d'excédent fort pour l'azote minéral. Les activités agricoles ont généré en 2010 en moyenne 32 kg par hectare de surplus d'azote, c'est-à-dire le quart de la fertilisation azotée globale et 23% de la quantité moyenne d'azote apporté par la fertilisation minérale. Néanmoins, on observe une forte variabilité régionale liée à la localisation des régions à forte composante de production animale (Commissariat général au développement durable, n°448, Septembre 2013). En effet, les zones de forte disponibilité des produits organiques, notamment les régions d'élevage intensif, sont aussi les plus excédentaires du point de vue du bilan N. Au sein de ces régions, les cultures fertilisées avec des fertilisants organiques sont plus excédentaires que les cultures fertilisées uniquement par des engrais minéraux. En grandes cultures, 75% des

surfaces des parcelles reçoivent exclusivement de l'azote minéral. La dose moyenne d'azote apportée est de 145 kgN/ha quand la fertilisation est exclusivement minérale. Les surfaces fertilisées à la fois par de l'azote organique et de l'azote minéral reçoivent 45 kg par hectare d'azote minéral en moins. Les céréales reçoivent en moyenne très peu d'azote organique en raison de la spécialisation agricole des régions (Enquête Pratiques Culturelles, 2006) mais aussi des contraintes relatives aux épandages vis-à-vis des besoins en azote de ces cultures.

Sous actions étudiées

A. Le premier volet concerne la **réduction de la dose d'engrais minéraux**, par la généralisation de la démarche du bilan d'azote minéral, et de la réduction des intrants dans les systèmes de culture ; il comporte deux sous-actions.

A1. Mieux ajuster la dose d'engrais minéral par un calcul de bilan d'azote

L'objectif était d'examiner l'impact d'une généralisation d'un calcul de bilan d'azote minéral, déjà obligatoire dans les "zones vulnérables" et repris dans le cadre réglementaire récent (voir dose "opposable" dans les arrêtés préfectoraux 2012), et son application effective aux grandes cultures. Le principe s'appuie sur l'équilibre entre l'offre et la demande en azote d'un peuplement permettant un calcul prévisionnel de la quantité d'engrais à apporter, ce calcul impliquant notamment la fixation d'un objectif de rendement, et l'estimation ou la mesure de reliquats d'azote à l'ouverture du bilan. Ce calcul prévisionnel peut être assorti d'un pilotage tactique de la fertilisation azotée, pour assurer un ajustement optimal avec la demande du peuplement grâce à l'utilisation d'indicateurs de nutrition azotée des peuplements. Cette méthode serait étendue à toutes les surfaces (zones vulnérables et non vulnérables). Pour toute information détaillée et actualisée sur cette méthode, on peut se référer au site du COMIFER (<http://www.comifer.asso.fr/>). Cependant l'enquête "Pratiques culturelles" 2006 a montré (Agreste, 2010) :

- une dose totale qui est légèrement inférieure quand la culture est fertilisée à la "dose habituelle" sans calcul explicite (et notamment sans prise en compte d'un objectif de rendement), comparée à la dose totale calculée par une méthode de raisonnement pour cette même culture ;
- une dose qui augmente lorsqu'un pilotage de la fertilisation est mis en œuvre (ce qui signifie que l'azote apporté en fonction de l'observation de carences azotées est une quantité supplémentaire, et ne résulte pas du fractionnement piloté d'une dose prévisionnelle totale calculée) ;
- une dose totale qui augmente avec le nombre de fractionnements des apports (ajout d'azote en fonction d'objectifs de qualité en dépassant, si nécessaire, la dose totale prévisionnelle) ;
- une surestimation fréquente et qui peut être importante des rendements espérés (entrant dans le calcul des besoins en azote) par rapport aux rendements réalisés, conduisant à une surestimation des besoins totaux en azote par rapport aux besoins réels. Les chiffres disponibles indiquent des écarts de rendements de l'ordre de 10 à 20% qui peuvent se traduire par des apports d'azote supérieurs aux besoins du peuplement de l'ordre de 10 à 60 kgN/ha/an (Tableau 6, section 5.1).

Même si la situation a sans doute évolué depuis l'enquête 2006, ces données suggèrent donc que les excédents d'azote minéral apportés sur les grandes cultures seraient d'abord liés à des rendements espérés souvent trop élevés, et dans une moindre mesure à la mise en œuvre de pratiques correctrices (fractionnement, outils de pilotage) intéressantes pour la quantité et la qualité de la biomasse produite mais qui, en moyenne, ne conduisent pas à réduire les doses d'azote. Le prix des produits agricoles d'une part et des engrais d'autre part, conduisent l'agriculteur à ne pas prendre le risque de limiter un rendement exceptionnel par une quantité d'azote minéral qui pourrait s'avérer être limitante de la production dans certains cas (Agreste Primeur, 2012).

Nous avons estimé l'atténuation possible avec un objectif de rendement plus réaliste pour les grandes cultures, et qui conduit à une réduction de la dose prévisionnelle d'azote apporté de l'ordre de 15 à 20 kgN/ha (soit 10 à 15% de la dose totale). Nous avons complété cette approche avec un second calcul un peu plus théorique de l'effet d'une bonne mise en œuvre du raisonnement prévisionnel et du pilotage de la fertilisation azotée à l'aide d'un Outil d'Aide à la Décision (OAD) sur la dose totale d'azote minéral apportée.

A2. Réduire la fertilisation azotée minérale dans le cadre d'une réduction d'intrants phytosanitaires (démarche Ecophyto 2018)

Cette sous-action correspond à la mise en place d'un scénario de réduction d'intrants caractérisé et chiffré dans l'étude Ecophyto R&D (INRA, 2009). Le scénario retenu est le scénario présenté dans les sections "Grandes Cultures" de l'étude réalisée par l'INRA, scénario d'une baisse de l'utilisation des pesticides d'un tiers par rapport à la situation actuelle, encore appelé scénario "protection intégrée" (ou niveau "2a"). Cette baisse est à peu près équivalente en grandes cultures et viticulture. Nous l'avons retenu au sein de plusieurs scénarios du rapport Ecophyto R&D car il n'implique pas une modification des systèmes de culture, et conduit à des diminutions faibles des rendements et correspond donc au cahier des charges de l'étude GES.

Cette étude utilise aussi l'enquête "Pratiques culturales" de l'année 2006, et donc les références sont compatibles avec celles utilisées dans les autres sous-actions. D'après la synthèse Ecophyto R&D, les baisses d'intrants phytosanitaires conduisent à des réductions de rendements (6% en grandes cultures) et induisent des baisses de fertilisation. Nous avons estimé pour ces cultures, la réduction totale de la fertilisation minérale, et l'atténuation permise par cette action.

L'effet principal est ici la réduction de la fertilisation minérale. Nous estimerons aussi en amont la réduction des émissions due à la réduction des produits phytosanitaires et des engrais, et les coûts.

B. Le second volet porte sur la meilleure substitution de l'azote minéral de synthèse par l'azote organique disponible, issus des effluents d'élevage et des déchets organiques.

B. Améliorer la valorisation des produits organiques apportés

Cette sous-action consiste à estimer la diminution de la fertilisation minérale permise par une meilleure valorisation des produits organiques (effluents d'élevage et déchets agroindustriels et urbains) sur les grandes cultures. Les études disponibles indiquent que les agriculteurs ne tiennent pas toujours compte des apports organiques dans leur bilan, parce que les volumes épandus et la composition des produits ne sont pas toujours précisément connus. Il y a donc souvent une fertilisation minérale plus forte que nécessaire, pour pallier l'incertitude, et ceci explique en particulier les surplus importants en zones d'élevage. La substitution est donc insuffisante. Pour les cultures recevant les effluents liquides ou solides, les pertes par volatilisation peuvent être très élevées. Les études soulignent que l'amélioration de la gestion des effluents en bâtiment ou lors du stockage reportent la question de la volatilisation au moment de l'épandage. Les pertes sont estimées en moyenne à environ 20% de l'azote total de ces produits, et cela concerne une proportion bien plus importante de la fraction ammoniacale. Ces pertes peuvent être considérablement diminuées, voire quasiment supprimées, si les épandages sont effectués directement au ras du sol et surtout avec des enfouissements (diminution de l'ordre de 35 à 95% de la volatilisation).

Pour les autres déchets (non animaux), le potentiel total de recyclage vers les sols agricoles serait 2,3 fois supérieur à l'utilisation actuelle, ce qui reste néanmoins marginal, la fertilisation par les déchets autres que les effluents d'élevage ne représentant que 2% des quantités totales d'azote fertilisant les sols agricoles. Tous les déchets recyclables vers les sols agricoles ne sont pas adaptés pour la fertilisation.

Au vu de ces éléments, la démarche adoptée a été la suivante :

- Nous avons considéré la proportion des surfaces ne tenant pas compte de l'apport organique apporté, ce qui a permis de calculer le volume total d'azote organique non pris en compte dans le calcul de la fertilisation minérale, à l'échelle France. En utilisant des coefficients d'équivalence engrais Keq (COMIFER, 2013), nous calculons alors les équivalents N engrais minéral qu'il est possible d'économiser à l'échelle annuelle.

- Nous avons utilisé des références sur la composition des produits, des données scientifiques et techniques sur l'importance de la volatilisation lors de l'épandage et l'effet de l'enfouissement sur ce processus (expertise collective INRA *Flux d'azote en élevage*). Il a été possible de calculer la quantité d'azote qui serait économisée grâce à la suppression de la volatilisation, avec une hypothèse basse et une hypothèse haute, tenant compte de la forte variabilité de la volatilisation (variabilité dépendant de la composition du produit et de la variabilité des émissions d'ammoniac).

Le potentiel maximal de fertilisation par les produits organiques a été déterminé, en fonction des caractéristiques des cultures, et les substitutions supplémentaires possibles ont été calculées en tenant compte du gisement de produits résiduels organiques (PRO) supplémentaire. Les coefficients d'équivalence engrais (Keq) ont ensuite été utilisés pour traduire cet accroissement du recyclage des PRO en économie sur les quantités d'azote des fertilisants de synthèse. En complément, nous avons confronté ces calculs avec un calcul basé uniquement sur les surplus à l'échelle France, ce qui revient à prendre en compte l'azote total des produits organiques sans utiliser de coefficient d'équivalence engrais des apports d'azote.

Pour cette sous-action, il n'y a pas de pertes de rendement et il y a une économie réalisée sur les fertilisants minéraux.

C. Le troisième volet de sous-actions porte sur une amélioration de l'efficacité de l'azote minéral des engrais de synthèse, par une modification des pratiques culturales lors des apports. L'amélioration de l'efficacité de l'azote apporté peut être augmentée en améliorant les pratiques (choix des formes, des dates d'apport, de la localisation) en plus de la quantité totale d'azote disponible, qui a été abordée précédemment. Nous avons retenu trois sous-actions.

C1. Ajuster les dates d'apport aux besoins des cultures

Cette sous-action a pour objectif de chercher un meilleur ajustement des apports d'azote avec les besoins des cultures afin d'améliorer le recouvrement de l'azote par les cultures concernées. Elle fait l'hypothèse que, dans un certain nombre de situations, le premier apport d'azote peut être retardé car le reliquat d'azote mesuré ou estimé à la fin de l'hiver est supérieur

aux besoins du peuplement végétal à cette période. Elle s'applique potentiellement aux céréales d'hiver et au colza. Le coefficient d'utilisation par les cultures de l'azote apporté très tôt en sortie d'hiver est en moyenne très faible, et augmente considérablement avec les dates d'apports plus tardives. Le fait de supprimer ce premier apport et de reporter la dose d'azote au début montaison ou plus tard, conduit à améliorer en moyenne l'efficacité de l'azote apporté sur la culture, et permet de diminuer la dose totale apportée.

Pour estimer l'assiette de cette sous-action, nous avons utilisé les données des mesures de reliquats sorties d'hiver dans le département de l'Aisne réalisées par le Laboratoire Département d'Analyses et de Recherches de l'Aisne (LDAR), pendant 8 ans (2005 à 2012). Ces données ont permis de calculer la proportion de situations pour lesquelles le premier apport d'azote pourrait donc être décalé dans le temps. Nous avons réduit la fertilisation totale en tenant compte d'un critère d'amélioration de l'efficacité pour l'azote apporté plus tardivement. Le report conduit alors à économiser de l'azote dans ces situations. Nous avons appliqué cette réduction à toute la sole France de ces cultures.

Les principaux effets sont la diminution de la dose totale sur une partie des cultures sans réduction des rendements, et la suppression d'un épandage. L'atténuation est obtenue à la fois par l'économie d'azote (émissions directe, indirecte et amont) et par la suppression d'un épandage.

C2. Adapter les formes d'azote minéral apportées

Nous avons quantifié deux options de modifications des formes d'azote apportées.

Le premier calcul concerne le ralentissement de l'apparition de nitrate dans les sols par l'utilisation d'inhibiteurs de nitrification combinés à des engrais uréiques ou ammoniacaux. Les inhibiteurs de nitrification sont très efficaces sur la réduction de l'émission de N_2O par kg N apporté (voir section 3.2) et sur les pertes (indirectes) d'azote. Il s'ensuit la possibilité de réduire les doses d'azote et de diminuer significativement les émissions de N_2O . Il n'y a pas de statistiques sur l'utilisation de tels produits en France. Il existe plusieurs formes : les engrais enrobés et les engrais avec inhibiteurs (appelés aussi engrais retard et engrais à libération contrôlée), et l'azote de synthèse organique. Ces engrais sont essentiellement utilisés en arboriculture, horticulture, maraîchage et viticulture, mais ils pénètrent progressivement le marché des grandes cultures, et nous explorons cette possibilité.

Le "modèle" d'inhibiteur que nous avons utilisé pour évaluer le potentiel de cette mesure est le DMPP (3,4 diméthylpyrazole phosphate). Nous avons pris comme modèle d'utilisation le produit ENTEC® actuellement mis sur le marché des engrais. L'effet principal, qui est la réduction du N_2O , n'est pas pris en compte dans le TIER1 qui ne considère pas les formes d'azote apportées.

La seconde option examinée est le remplacement des engrais à base de formes uréiques et majoritairement ammoniacale (solution azotée) par le nitrate d'ammonium, afin de réduire les risques de volatilisation et diminuer la quantité d'azote apportée. La littérature ne montre pas de réduction des émissions de N_2O lors d'apports d'engrais ammoniacaux, excepté dans les conditions où la nitrification est très lente ou ralentie par un inhibiteur. Le risque pris par ces formes d'azote en matière de volatilisation d'ammoniac conduit généralement à la recommandation d'augmenter la dose d'azote, par exemple de 10 à 20% pour la solution azotée (en fonction des types de sol principalement), pour compenser le risque de volatilisation d'ammoniac (Le Souder et Taureau, 1997). Sur différentes cultures et dans de nombreux essais, on observe des écarts significatifs de rendements et de qualité à même dose apportée en faveur de l'ammonitrate, et l'optimum de rendement est obtenu pour l'ammonitrate avec des doses nettement inférieures d'azote apporté (Berthoud, 2010 ; Chambers et Dampney, 2009). Pour les utilisateurs, l'augmentation de doses avec l'urée ou la solution azotée est compensée actuellement par le plus faible coût de ces engrais uréiques comparé à celui des ammonitrates.

La stratégie choisie a été de calculer à l'échelle France le potentiel de réduction de la fertilisation minérale et les atténuations associées, en considérant la substitution des engrais uréiques et des solutions azotées par l'ammonitrate. Le coût supplémentaire est lié aux prix des engrais, et en partie compensé par la réduction de la dose apportée. Il n'y a pas d'effets sur le rendement.

C3. Enfouir de manière localisée les engrais minéraux dans les sols

Apporté le plus généralement à la surface des sols, par épandage, l'engrais azoté peut, dans certains cas, être localisé dans le sol à proximité des racines, le long de la ligne de semis, ou en bandes latérales entre les rangs, techniques qui améliorent son recouvrement par les plantes et supprime le risque de pertes par volatilisation. Des données disponibles (ITB, 2008 ; ITB, 2009 ; Thomas, 2011) montrent que les apports localisés permettent une diminution des doses d'azote pour des rendements équivalents (-17 kgN/ha à -30 kgN/ha pour les céréales de printemps, -10 à -20% pour la betterave sucrière ; CA80, 2011). Cette pratique conduit à une meilleure efficacité de l'azote apporté et donc à une réduction potentielle des doses. La pratique est efficace sur la dose N, mais pas significative sur les émissions de N_2O par kg N apporté.

La stratégie choisie est d'appliquer cette sous-action aux engrais minéraux apportés sous forme solide, dans les situations où l'intérêt d'apporter de l'engrais au semis est avéré. Ceci est vrai pour les cultures de printemps, et notamment celles qui ont des besoins importants en début de cycle : blé de printemps, orge de printemps, pommes de terre, betteraves, maïs.

Les effets sont une meilleure efficacité de l'azote, et donc une réduction de la fertilisation azotée, pour un rendement équivalent avec une suppression de la volatilisation d'ammoniac sur le premier apport, une réduction de la dose totale d'azote, et pas d'effet significatif sur les émissions de N₂O par kg de N apporté.

Tableau 1. Récapitulatif des sous-actions étudiées

Volet	Sous –action	Stratégie
Réduire la dose d'engrais minéral	A1. 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
	A2. Réduire la fertilisation azotée dans le cadre d'une réduction d'intrants phytosanitaires	En réduisant les apports de pesticides et adaptant les intrants azotés
Mieux substituer l'azote minéral de synthèse par l'azote des produits organiques	B. Améliorer la valorisation des produits organiques apportés	En prenant mieux en compte N organique apporté, en minimisant les pertes par volatilisation lors de l'épandage, en augmentant le volume de déchets recyclés
Améliorer l'efficacité de l'azote minéral des engrais de synthèse	C1. Ajuster les dates d'apport aux besoins des cultures	En tenant mieux compte des reliquats d'azote minéral en sortie d'hiver
	C2. Adapter les formes d'azote minéral apportées	En utilisant des inhibiteurs de nitrification, et en modifiant les formes d'engrais pour minimiser les pertes par volatilisation
	C3. Enfouir les engrais minéraux dans les sols	En minimisant les pertes notamment par volatilisation

2.c. Rapports et expertises majeurs ayant déjà examiné/évalué l'action

Un certain nombre d'études ont examiné dans d'autres pays la capacité d'atténuation des GES par des pratiques culturales adaptées ; les données, pour les sous-actions qui concernent la gestion de la fertilisation minérale et organique des cultures, sont reportées au Tableau 2. L'étude menée par Smith et al. (2008) a évalué le potentiel global d'atténuation en 2030 par toutes les pratiques agricoles sur toutes les terres agricoles de la planète, en se basant sur les résultats de la littérature et sur les données disponibles au niveau mondial quant à l'occupation des terres et aux pratiques agricoles moyennes. En ce qui concerne la gestion de la nutrition des cultures annuelles, les leviers soulignés sont identiques à ceux développés dans notre étude, à savoir l'augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'azote apporté par les fertilisants et les produits organiques, ceci à travers une précision accrue sur les besoins en azote des cultures, la synchronisation entre la disponibilité de l'azote et les besoins de la culture, l'amélioration de l'absorption par la plante grâce à la localisation de l'engrais, etc. Les données obtenues pour l'atténuation permise par la réduction des émissions de N₂O sont, en considérant une réduction des apports de N, de 80% des apports actuels. Le potentiel d'atténuation pour les émissions de N₂O est estimé à 0,07 (0,01-0,32) MgCO₂e/ha/an.

L'étude menée aux Etats-Unis (Eagle et al., 2012) examine à partir des données de la littérature et de données non publiées américaines, le potentiel d'atténuation des différentes pratiques de gestion et d'occupation des sols agricoles. Lorsque les données étaient insuffisantes, des données venant du Canada ou d'autres pays ont été utilisées. En ce qui concerne l'utilisation des produits organiques résiduels, cette étude a estimé qu'aux Etats-Unis environ 60% de N provenant des produits organiques étaient appliqués en excès par rapport aux besoins optimaux de l'exploitation sur lesquels ils étaient produits. Au sein de ces produits organiques en excès, 80% du N pouvaient être utilisés (recyclés) dans la région d'origine de la production (le comté), sans excéder des transports de plus de 15 km de distance. Cette étude n'a pas considéré de potentiel d'atténuation via la réduction des émissions de N₂O, étant donné les résultats contradictoires de la littérature sur ce point. L'atténuation provient dans certains cas de l'augmentation du carbone organique (0,18-5,10 MgCO₂e/ha/an), mais il est souligné que la plupart des produits sont déjà recyclés. L'amélioration des méthodes d'épandage des effluents d'élevage est retenue dans l'optique de réduire les pertes directes (volatilisation) et indirectes (nitrate). La solution principale soulignée est la prise en compte des apports dans le raisonnement par l'agriculteur, et il est estimé que 40% des agriculteurs ne tiennent pas compte des apports organiques. D'autres pratiques (dates d'apport, formes d'apport) sont aussi considérées. Le potentiel d'atténuation est estimé à 0,37-1,22 MgCO₂e/ha/an pour 12 Mha.

Pour la fertilisation minérale, les auteurs examinent la réduction de la dose, le changement de la forme d'azote apportée, l'effet de l'enfouissement localisé de l'engrais, de la date d'apport et l'utilisation d'inhibiteurs de la nitrification. En ce qui concerne la réduction de la dose d'azote, il est souligné que les scientifiques s'accordent difficilement sur le fait que les doses apportées sont excédentaires ou pas par rapport aux besoins en azote des cultures. Il est considéré que la réduction peut concerner 12% à 20% de la dose totale, sans affecter réellement les rendements, et une réduction de 15% des doses totales N est retenue comme valeur moyenne pour l'étude.

Tableau 2. Synthèses des estimations de potentiel d'atténuation unitaire, de diverses études étrangères, pour les actions relatives à la gestion de la fertilisation minérale

author	Climate zone	practice	N ₂ O (Mg CO ₂ -eq. ha ⁻¹ yr ⁻¹)			Maximum applicable area Mha
			mean	low	high	
Smith et al. 2008	cool-moist	nutrient management	0.07	0.01	0.32	-
Eagle et al 2012	US	apply organic materiel	0.00	0.00	0.00	8.5
Eagle et al 2012	US	reduce fertilizer rate	0.28	0.03	0.82	68.0
Eagle et al 2012	US	switch from anhydrous ammonia to urea	0.59	0.03	1.47	37.0
Eagle et al 2012	US	swith to slow release fertilizer	0.12	0.04	0.21	93.0
Eagle et al 2012	US	change in fertilizer placement	0.25	0.00	0.69	63.0
Eagle et al 2012	US	change fertilizer N timing	0.18	0.00	0.53	53.0
Eagle et al 2012	US	use of nitrification inhibitors	0.41	0.02	1.04	92.0
Eagle et al 2012	US	improve manure management	-	0.37	1.22	12.0
Moran et al. 2008	UK	reduce N fertilizer rate	0.50	-	-	6.4
Moran et al. 2008	UK	avoiding N excess	0.40	-	-	8.8
Moran et al. 2008	UK	full allowance of manure N supply	0.40	-	-	7.6
Moran et al. 2008	UK	improved timing of mineral N application	0.30	-	-	8.1
Moran et al. 2008	UK	controlled release fertiliser	0.30	-	-	8.1
Moran et al. 2008	UK	nitrification inhibitors	0.30	-	-	8.1
Moran et al. 2008	UK	split fertilization	0.05	-	-	3.7
Moran et al. 2008	UK	use of the right form of mineral N fertilizer	0.05	-	-	3.3
Moran et al. 2008	UK	Placing N precisely in soil	0.05	-	-	2.3

Les *formes d'azote utilisées* ne sont pas les mêmes aux Etats-Unis et en France, et l'étude examine seulement le basculement de l'ammoniac sous forme anhydre à l'urée et l'utilisation des fertilisants à relargage lent (engrais enrobés). La distinction entre des effets directs sur les émissions de N₂O et des effets indirects *via* une amélioration de l'efficacité de recouvrement de l'azote par les cultures n'est pas faite. L'effet est estimé en moyenne à 0,12 MgCO_{2e}/ha/an. L'effet de *la localisation de l'engrais* sur les émissions de N₂O est estimé pouvoir concerner 60% des grandes cultures des Etats-Unis, soit 63 Mha. Il est souligné que les atténuations constatées résultent souvent d'une diminution des apports d'azote permise par l'incorporation, alors que les effets directs sur les émissions de gaz ne sont pas systématiques. L'atténuation moyenne tous effets confondus est de 0,25 MgCO_{2e} /ha/an. La modification de la *date d'apport de l'azote* de l'engrais, en retardant celle-ci dans le cycle cultural des cultures, permet une diminution grâce à une meilleure synchronisation avec les besoins et une réduction de toutes les pertes d'azote. Cette mesure est estimée pouvoir concerner 50% des surfaces, soit 53 Mha. Elle permet une réduction moyenne de 0,18 MgCO_{2e}/ha/an. Enfin, l'atténuation potentielle permise par l'usage d'*inhibiteurs de nitrification* est estimée à 0,41 MgCO_{2e}/ha/an ; son utilisation actuelle est très restreinte et l'étude envisage son utilisation sur la totalité des surfaces concernées soit 92 Mha.

Dans cette étude, il est proposé que l'intégration de ce qui est appelé "les quatre R" (*right rate, right source, right placement, right timing*), peut être faite grâce à la mise en œuvre des techniques de l'agriculture de précision, permettant notamment de piloter mieux spatialement et temporellement les apports d'azote. Il est souligné que la diminution des doses d'application des fertilisants minéraux (résultant de ces effets cumulés) peut être une des manières les plus efficaces de réduire les émissions de N₂O. Au sein de toutes les actions portant sur les pratiques agricoles examinées par cette étude, les 6 sous-actions détaillées ici proposent des potentiels d'atténuation relativement faibles mais qui portent potentiellement sur des assiettes importantes à l'échelle du pays (ha).

L'étude menée en Angleterre (Moran et al., 2008) a concerné plus d'une centaine d'actions, au sein desquelles on retrouve celles relatives à la gestion de N. Toutes sont dans un premier temps estimées globalement pour leur potentiel d'atténuation et leur coût, puis de nombreuses actions ne sont pas conservées dans l'analyse finale en raison de leur potentiel d'atténuation faible et/ou de leur coût élevé. L'importance des potentiels d'atténuation et des surfaces potentiellement concernées est indiquée Tableau 2. Cette étude diffère des autres études par le fait que les actions relatives à l'amélioration de l'efficacité de l'azote (dates d'apport, formes d'apport et localisation des apports) ne sont finalement pas retenues en raison de leur faible potentiel unitaire d'atténuation.

Le rapport PICCMAT (Flynn et al., 2007) examine les différentes options pour optimiser l'application des engrais azotés. Il est estimé que la réduction de la dose d'engrais peut être significative et concerner -25 à -30% des doses apportées notamment grâce à une localisation plus précise permise par les méthodes de précision (en référence à 2000), et une réduction d'environ 10% grâce au fractionnement des apports. Les techniques concernant les formes d'azote (engrais à relargage lent, inhibiteurs de nitrification) sont évoquées mais leurs effets ne sont pas chiffrés.

Enfin, l'étude menée par le CSIRO en 2009 examine au sein d'une large gamme d'options, le potentiel d'atténuation des sols cultivés, et notamment celui permis par la gestion de la fertilisation azotée (Dalal et al., 2009). Cette étude est réalisée sur l'Etat du Queensland puis extrapolée à l'ensemble de l'Australie. Les différents principes pour minimiser les émissions *via* une meilleure efficacité de l'azote apporté, et une réduction des doses, sont listés et on y retrouve les mêmes propositions, mais il n'y a pas de chiffrage des atténuations unitaires pour ces actions.

3. Etat des connaissances sur les phénomènes/mécanismes sous-jacents et leur quantification

3.1. Les émissions de N₂O liés à la fertilisation minérale

Les sols peuvent fonctionner comme source mais aussi comme puits de N₂O, par l'intermédiaire de mécanismes biotiques et abiotiques. Néanmoins, à l'échelle globale, la production de N₂O par les sols est supérieure à leur consommation. De nombreux groupes microbiens sont impliqués dans la production et la consommation de N₂O. La nitrification et la dénitrification biologique sont considérées comme les deux principaux processus source de N₂O. Seule la dernière étape de la dénitrification est connue comme le mécanisme de consommation de ce gaz (Figure 1).

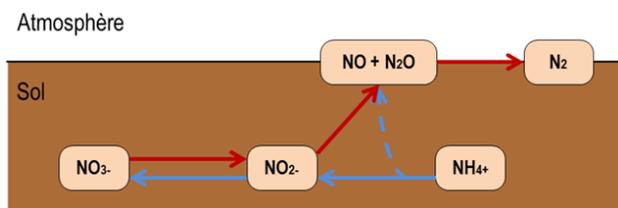


Figure 1. Représentation schématique et simplifiée des processus biologiques impliqués dans les émissions de N₂O par les sols : la nitrification (→) observée généralement en conditions de bonne aération du sol et la dénitrification (→) observée généralement en conditions de faible aération du sol.

La **dénitrification** est la réduction successive des formes oxydées de l'azote, ioniques solubles (nitrate : NO₃⁻ et nitrite : NO₂⁻) puis gazeuses (oxyde nitrique : NO ; oxyde nitreux ou protoxyde d'azote : N₂O) en azote moléculaire (N₂). La dénitrification biologique est une respiration microbienne, où les formes oxydées de l'azote servent d'accepteurs d'électrons, ce qui s'observe en général en cas d'absence d'oxygène. Les composés organiques du sol jouent le rôle de donneur d'électrons dans cette chaîne de réaction. Chaque étape de la dénitrification est catalysée par une enzyme spécifique. La capacité de réaliser la première étape de la dénitrification est présente chez une forte proportion (de l'ordre de 80%) des microorganismes du sol. En revanche, les organismes capables de réduire les nitrites en gaz (N₂O ou N₂) représenteraient moins de 5% de la microflore du sol (Philippot et Germon, 2005). Conduit jusqu'à son terme (N₂), le processus de dénitrification s'avère d'un grand intérêt pour la protection de l'environnement. Il permet l'élimination, sans transfert de pollution, des formes solubles de l'azote (NO₃⁻, NO₂⁻) qui peuvent affecter la santé publique (en fortes concentrations dans l'eau de boisson et l'alimentation) et contribuer à l'eutrophisation des milieux (concentrations élevées dans les eaux de surface). En revanche, si le processus de dénitrification est ralenti sur les étapes de réduction des formes gazeuses oxydées intermédiaires de la chaîne (NO_x, N₂O), ces gaz sont rejetés dans l'atmosphère où ils sont impliqués dans 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 N₂O, comme cela a été démontré sur des souches pures (Blackmer et al., 1980) et sur des échantillons de sol (Garrido et al., 2002). Les mécanismes conduisant à la libération de N₂O au cours de la nitrification ne sont pas clairement connus. Certains auteurs proposent que

N₂O soit formé au cours de l'oxydation de l'ammonium, tandis que le mécanisme "nitrification/dénitrification", c'est-à-dire la production de N₂O à partir de NO₂ issu de la nitrification, est de plus en plus mentionné dans la littérature.

Du fait de la coexistence dans les sols de zones aérobies et anaérobies, les processus de nitrification et de dénitrification peuvent fonctionner simultanément. De plus, des interactions existent entre ces deux processus par les composés azotés qu'ils ont en commun (nitrate, nitrite, oxyde nitreux...).

Les émissions de N₂O par les sols se caractérisent par une variabilité spatiale et temporelle très importante. Leurs histogrammes de fréquence de distribution suivent en général une loi de distribution log-normale. Spatialement, cette variabilité est observée à toutes les échelles d'étude (de la micro-échelle à l'échelle régionale), avec l'existence de points d'émissions très élevées ("hot spot"). De même, les fluctuations temporelles s'observent à différentes échelles telles que la minute, la journée ou la saison (Laville et al., 1997).

Les émissions de N₂O les plus importantes sont généralement observées soit après les 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.

Récemment, Stehfest et Bouwman (2006) ont compilé et analysé les résultats de 1008 publications présentant des flux de N₂O mesurés dans des sols agricoles. La base de données (http://www.mnp.nl/images/stehfest_data_tcm61-29733.xls) montre des flux journaliers compris entre -2 gN/ha/j et 5400 gN/ha/j, ces deux valeurs ayant été obtenues sous climat tempéré. 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). A l'échelle globale, Stehfest et Bouwman (2006) ont validé une relation linéaire entre l'intensité des flux (kgN-N₂O/ha/an) et les quantités d'azote apportées à la parcelle (kgN/ha/an) dont la pente de 0,91%, servira dans le futur de valeur de référence dans la méthodologie de calcul des émissions de N₂O à l'échelle nationale proposée par l'IPCC.

D'autres auteurs, européens (van Groenigen et al., 2010) ou américains (Millar et al., 2010), mettent en évidence une augmentation non linéaire des émissions de N₂O avec les apports de fertilisants. Ces auteurs ont proposé des relations quantitatives entre les quantités d'azote minéral épandues et les émissions de N₂O.

Nous avons compilé ces fonctions issues de la littérature internationale et positionné les estimations annuelles d'émission de N₂O issues des mesures réalisées en France en fonction des quantités d'azote apportées (Figure 2).

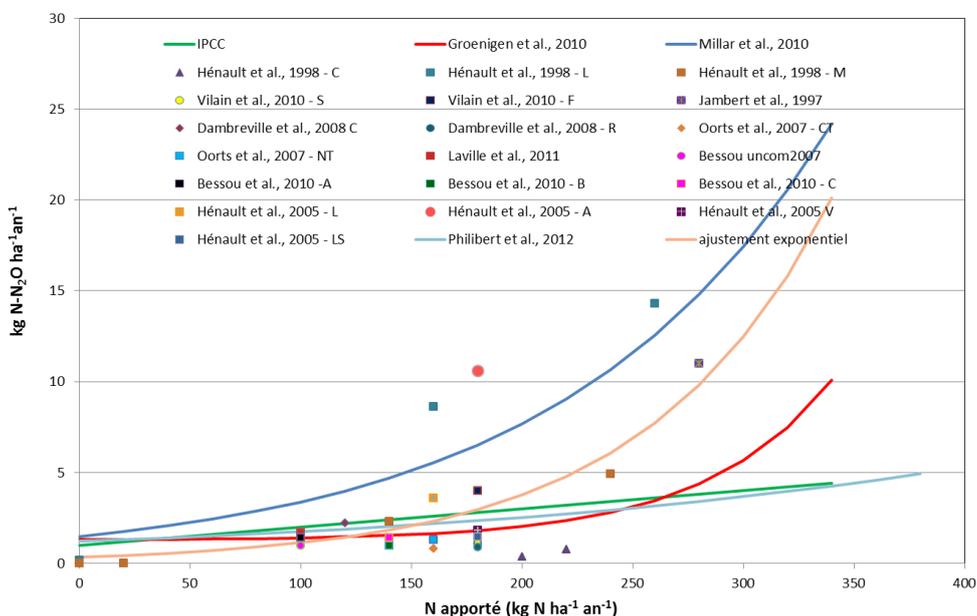


Figure 2. Compilation de fonctions et de résultats de campagnes de mesures mettant en relation les émissions de N₂O et l'azote minéral apporté au sol

Nous observons que les données françaises sont très variables. Globalement, elles s'inscrivent dans la fourchette proposée par différentes fonctions de la littérature, en particulier la fonction proposée par van Groenigen et al. (2010) (limite basse) et la fonction proposée par Millar et al. (2010) (limite haute). Ces fonctions sont des exponentielles, et cette forme de relation a été aussi retenue récemment dans le travail de Philibert et al. (2012). Nous avons donc cherché à définir une fonction de type exponentiel à l'échelle de la France.

La fonction $E(N_2O) = 0,34 \cdot e^{(0,012 \cdot N)}$ est significative ($r^2 = 0,51$; $n = 15$; $p < 0,05$), bien que l'incertitude sur le paramètre 0,34 soit très importante. Le tableau de l'analyse de variance associée à cet ajustement est présenté en Annexe 7.

Dans le second calcul de l'étude (calcul "expert"), les potentiels d'atténuation des émissions directes vont être calculés à l'aide de la fonction exponentielle définie dans le cadre de cette étude. Ils seront encadrés par les valeurs obtenues à l'aide de la fonction publiée par van Groenigen et al. (2010) (limite basse) et Millar et al. (2010) (limite haute).

3.2. Impact de la forme d'azote sur les émissions de N₂O

La littérature montre une grande hétérogénéité des résultats de comparaison de l'impact des formes des engrais minéraux appliqués au sol sur les émissions de N₂O (Venterea et al., 2005 ; Tenuta and Beauchamp, 2003), et ces travaux se heurtent aux confusions possibles d'effets entre forme chimique, forme physique (solide vs. liquide) et localisation (en surface, incorporé, injecté). Millar et al. (2011) n'ont pas retenu la prise en compte de la forme des fertilisants minéraux dans leur protocole de réduction des émissions de N₂O par les sols. L'étude récente conduite au Royaume-Uni (Smith et al., 2012) comparant l'impact des formes suivantes, calcium ammonium nitrate (CAN), ammonitrates (AN) et urée (U) sur 5 sites expérimentaux a observé aussi des effets très variables des formes d'azote, avec des émissions les plus importantes après apport d'AN pour 2 sites, après apport d'urée pour 2 sites et après apport de CA pour 1 site et dans ce cas avec des émissions très fortes. Les travaux français réalisés sur ce thème (Hénault et al., 1998) ont montré des dynamiques d'émission de N₂O variables selon les formes d'engrais appliquées, légèrement supérieures pour les formes ammoniacales que pour les formes urée et nitriques, cet ordre pouvant probablement varier avec les conditions climatiques. D'autres travaux montrent que des moindres émissions de N₂O de l'azote apporté sous forme ammoniacale et la variabilité des effets des formes pourraient résulter de l'importance variable de la volatilisation de l'ammoniac qui réduit de fait la quantité d'azote pouvant être nitrifiée (Smith et al., 2012).

Il existe plusieurs techniques pour ralentir la libération d'azote minéral après apport d'engrais de synthèse dans les sols : utilisation d'inhibiteurs de la nitrification et/ou inhibiteur de la minéralisation de l'urée par l'uréase, ces inhibiteurs pouvant être produits par synthèse chimique ou pouvant être d'origine biologique (Subarao et al, 2012). Parmi les plus répandus dans le monde, on trouve comme inhibiteur de la nitrification les composés nitrapyrin®, dicyandiamide® ou DMPP Entec®, et comme inhibiteur de l'uréase nBTPT (N-(n-butyl)thiophosphoric triamide). Un enrobage de l'urée (Su ou polymère) peut aussi permettre de ralentir la minéralisation de l'urée. La Nouvelle Zélande s'est engagée depuis plusieurs années déjà dans l'utilisation d'inhibiteurs de la nitrification pour diminuer les émissions de N₂O par les sols. Des études notamment en sol de prairie ont montré une diminution des émissions de N₂O par l'application de l'inhibiteur commercialisé sous le nom eco-N (Di and Cameron, 2003). Clough et al. (2007) ont proposé un inventaire des émissions de N₂O par les sols agricoles à l'échelle de la Nouvelle Zélande incluant un facteur d'émissions spécifiques à l'apport combiné de fertilisant et du produit eco-N, d'une valeur de 80% du facteur IPPC pour les fertilisants de synthèse. Au Royaume-Uni, les travaux conduits récemment par Smith et al. (2012) suggèrent que l'utilisation d'inhibiteur de l'uréase "nBTPT", peut réduire dans certains cas à la fois les émissions de N₂O et de NH₃. En revanche, Dobbie et Smith (2003) n'ont pas trouvé d'effets de l'utilisation d'inhibiteur de l'uréase sur les émissions de N₂O. Zaman et al. (2009) ont successivement observé un faible effet puis pas d'effet de l'utilisation du nBTPT. En Espagne, Menendez (2009) n'a pas observé d'effet de l'utilisation du nBTPT, tandis de Vallejo et al. (2006) ont observé une importante réduction des émissions de N₂O grâce à l'emploi du nBTPT en conditions semi-arides. Smith et al. (2012) soulignent l'importance de développer des travaux permettant de connaître les conditions d'utilisation du nBTPT permettant de réduire les émissions de N₂O pour pouvoir l'utiliser pour réduire les émissions de N₂O par les sols.

Une méta-analyse (Akiyama et al., 2010) indique un fort potentiel de réduction de N₂O pour les inhibiteurs de nitrification. Cette analyse s'appuie sur les jeux de données publiés par : Dittert et al. (2001) ; Linzmeier et al. (2001) ; Macadam et al. (2003) ; Menendez et al. (2006) ; Merino et al. (2005) ; Weiske et al. (2001). Elle montre une diminution des émissions directes de N₂O de -50% (-55% à -42%) pour des mesures effectuées sur une durée de quelques mois après les apports de fertilisants. On considère en général que le DMPP est actif sur une durée de 4 à 10 semaines (Zerulla et al., 2001). Plusieurs articles de la littérature soulignent une diminution de la lixiviation du nitrate suite à l'utilisation du DMPP (Li et al., 2009 ; Zerulla et al., 2001). Il n'a pas été référencé d'effet du DMPP sur la volatilisation (Li et al., 2009 ; Menendez et al., 2006).

De tels résultats expliquent l'engouement très fort pour les inhibiteurs de la nitrification (International N workshop, 2012), notamment pour les effluents d'élevage.

Pour les engrais enrobés (*polymer-coated fertilizers*), cet effet est moins systématique : en fait l'avantage donné par les engrais enrobés sur le N₂O dépend de la vitesse de nitrification, et cette amélioration n'est apparemment visible que dans les sols temporairement saturés, où le nitrite pourrait s'accumuler (faible nitrification) et où l'intérêt du relargage lent de l'ammonium est intéressant (valeur moyenne -35% mais avec -77% dans des prairies mal drainées).

Sur le terrain, les formes d'engrais disponibles sont les suivantes :

- Les engrais enrobés : les granules d'engrais comportent une enveloppe qui s'hydrolyse peu à peu en fonction de la température et de l'humidité (polymères, autres formulations, différentes épaisseurs). Les distributeurs annoncent une réduction du nombre d'apports possible (*formulations type COTEN, gamme engrais DURAMON*) ;
- Les inhibiteurs : l'azote est associé à une molécule qui occasionne des effets temporaires d'inhibition, (i) inhibiteurs de l'uréase et (ii) inhibiteur de la nitrification sur l'étape de nitrification (nitrosomonas) (ex. ENTEC®). Les distributeurs annoncent une infiltration améliorée des engrais avant hydrolyse en ammonium, et une limitation des pertes par volatilisation pour (i), et une limitation de la lixiviation et de la dénitrification pour (ii). L'augmentation de l'efficacité de N permet de réduire le nombre d'apports tout en conservant l'efficacité d'un fractionnement (simplification des chantiers) ;
- L'azote organique de synthèse : il est composé de longues chaînes organiques (urée polymérisée) qui doivent être hydrolysées pour libérer de l'urée. Cette forme s'adresse principalement aux espaces verts.

A ce stade de connaissance, l'utilisation des inhibiteurs de la nitrification est une piste importante à considérer pour diminuer les émissions de N₂O par les sols. Des recherches sont nécessaires pour maîtriser les conditions dans lesquelles ces produits permettent de diminuer les émissions de N₂O.

3.3. Impact de la localisation de l'engrais sur les émissions de N₂O

Les résultats dans la littérature internationale donnent des informations contradictoires sur l'effet de la localisation de l'engrais (*placement* en anglais) sur les émissions de N₂O, car deux pratiques culturales sont parfois associées (localisation et labour/non-labour) et l'avantage conféré par la localisation en profondeur est largement dépendant du régime hydrique des sols (anoxie et potentiel de réduction au cours de la diffusion du N₂O vers la surface). Dans l'article de synthèse de Millar et al. (2010) sur les stratégies de réduction des émissions de N₂O dans les systèmes de culture de maïs intensifs aux Etats-Unis, la localisation de la fertilisation minérale n'est pas retenue car les études sur ce thème conduisent à des résultats contradictoires. Ces auteurs citent les travaux de Liu et al. (2006) pour lesquels l'injection en profondeur (10-15 cm) de solution azotée (32% N) sur des essais en micro-parcelles diminue les émissions de N₂O, tandis que les travaux de Drury et al. (2006) montrent des émissions de N₂O plus importantes avec injection à 10 cm d'ammonium nitrate comparée à une injection plus superficielle. Récemment, Nash et al. (2011) ont observé moins d'émission de N₂O par unité de production de maïs en sol labouré avec apport profond de l'engrais par rapport à un apport de surface en sol non labouré. Des rapports d'expérimentation (Johnston, 2005 ; Engel et al., 2008) n'ont pas montré d'effet de la localisation du fertilisant sur les émissions de N₂O pour le premier, et des émissions plutôt plus faibles pour une fertilisation diffuse pour le second.

4. Degré et mode de prise en compte des principaux postes d'émissions concernés par l'action dans le cadre de l'inventaire national 2010 et perspectives d'évolution

Les principaux postes d'émissions de cette action et les secteurs concernés de l'inventaire national sont les suivants :

Dans la sous-catégorie "Sols agricoles" (4D) de la catégorie "Agriculture" (CRF4) sont calculées les émissions des sols agricoles, qui comprennent :

- les émissions directes de N₂O liées aux apports d'engrais minéraux de synthèse,
- les émissions directes de N₂O liées aux apports de produits organiques résiduels,
- les émissions indirectes de N₂O (redéposition atmosphérique, écoulement des eaux et lixiviation des sols) liée aux fertilisations minérales et organiques.

Dans la sous-catégorie "Chimie" (CRF 2B) de la catégorie "Procédés Industriels" (CRF2) :

- la consommation d'énergie et les émissions de N₂O liés à la fabrication des engrais minéraux (production nationale) pour différentes formes d'engrais.

Dans la sous-catégorie "Autres secteurs" (1a4) de la catégorie "Energie" (CRF1) :

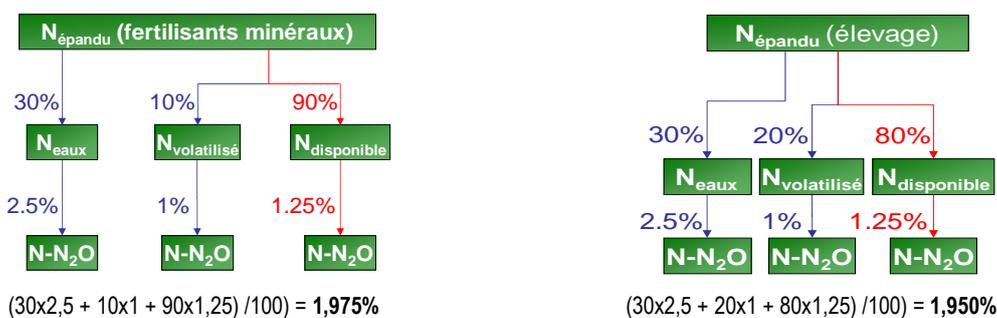
- le transport des engrais minéraux de l'étranger (importation) et dans le territoire national,
- l'énergie liée à l'utilisation des engins agricoles (épandage des fertilisants),
- l'énergie liée à la fabrication et au transport des produits phytosanitaires.

Les modifications des émissions directes et indirectes sur sol agricole liées aux formes d'azote et aux pratiques culturales ne sont pas prises en compte par les inventaires nationaux.

En ce qui concerne les émissions de N₂O, qui sont la principale source de GES pour cette action, au niveau national, 56% des émissions de N₂O proviennent de l'application de l'azote minéral et organique, 15% de la fabrication de l'azote minéral et 13% des résidus de cultures, 9% de la lixiviation du nitrate et 6% de la volatilisation de l'ammoniac (NH₃) (source statistiques Commissariat général au développement durable, Service de l'observation et des statistiques, 2011).

Les émissions sont actuellement prises en compte par le facteur d'émission TIER 1. Le facteur d'émission global à appliquer à la quantité d'azote épandue est de 1,975% du N apporté sous forme de fertilisants minéraux, et de 1,950% pour l'azote des effluents d'élevage épandus (Figure 3).

Figure 3. Composantes des coefficients d'émission globaux (TIER 1) pour les fertilisants minéraux et pour l'azote épandue des effluents d'élevage



source : CITEPA

De nouvelles valeurs ont été adoptées en 2006 par le GIEC, mais leur application aux inventaires nationaux n'a pas été décidée pour l'instant. Plusieurs paramètres du secteur de l'agriculture concernant cette action seraient notablement révisés :

- Facteur de conversion N → N-N₂O dans les sols : 1,0% au lieu de 1,25%
- Facteur de conversion N → N-N₂O dans les eaux : 0,75% au lieu de 2,5%

Ce dernier paramètre a beaucoup d'importance, et il réduit notablement les émissions indirectes de N₂O à l'échelle de l'exploitation (1,225% N apporté), ce qui correspondrait à une baisse de plus de 37% par rapport aux émissions calculées actuellement. Les inventaires ne tiennent pas compte des effets des pratiques culturales sur les émissions, mais uniquement des quantités apportées, et il en résulte une estimation des émissions strictement dépendantes des quantités. Cette méthode ne permet donc pas de prendre en compte les améliorations des pratiques, et ne favorisent pas ces améliorations.

Une des critiques adressées (Eagle et al., 2012) est que la proportion d'azote émis est très variable après apport d'engrais, et plutôt supérieure à 1% à l'échelle de la parcelle (mais pas forcément en moyenne à l'échelle d'un territoire). La dénitrification est sensible à la concentration en azote et donc non proportionnelle, et l'on peut donc penser que le % émis varie en fonction de la concentration. Réduire, fractionner, voire ralentir l'apparition de la forme nitrique, pourrait contribuer à diminuer les pertes directes et donc à diminuer le facteur 1%. Il n'y a pas de prise en compte de l'effet "forme de l'engrais" sur les émissions de N₂O. Les calculs TIER 1 ne traduiront pas l'effet escompté par la substitution d'une forme minérale par une autre. La synthèse récente quasi-exhaustive des effets sur les émissions de N₂O (Stehfest et Bouwman, 2006) ainsi que l'analyse des données d'émissions issues d'essais français publiées seront utilisées pour un second calcul (calcul "expert").

5. Calcul du potentiel d'atténuation et du coût de chaque sous-action

Le potentiel d'atténuation de chaque sous action est la somme :

- des émissions directes à la parcelle (Edp),
- des émissions indirectes par volatilisation (Eiv), et par lixiviation (Eil),
- des émissions amont lors de la synthèse et du transport des engrais (Eae) ou lors des épandages (Eat).

La première méthode de calcul est basée sur l'utilisation des coefficients tels que définis par CITEPA (cf. section 4).

La seconde méthode est différente de la première sur les postes Edp, Eiv et Eil :

- Pour le poste Edp, nous utilisons les fonctions définies précédemment, dont les équations se trouvent dans le Tableau 3. Un coefficient d'efficacité de l'azote (k) est affecté à cette fonction. Il est *a priori* de 1. Si la mesure permet d'améliorer l'efficacité de l'azote, ce coefficient prend des valeurs inférieures à 1 de façon à ce que l'augmentation de l'efficacité de l'azote se traduise par une diminution des émissions directes de N₂O. Les valeurs de k ont été définies au vu de la littérature.

- Pour les postes Eiv et Eil, nous proposons d'utiliser comme base de calcul la méthodologie IPCC 2006. Nous utilisons dans un premier temps, les facteurs FracVol et EFvolat ainsi que les facteurs FracLeach et EFLeach proposés (colonnes intitulées "avant" dans le Tableau 3). En fonction du mode d'action de la mesure, nous pouvons avoir été amenés à modifier ces coefficients pour traduire l'effet de la mesure (colonnes "après" dans le tableau). Les nouvelles valeurs introduites ont été déduites d'une analyse bibliographique ; ces nouvelles valeurs sont surlignées dans le tableau.

Tableau 3. Equations et coefficients utilisés dans les calculs d'atténuation (en kgN-N₂O/ha/an)

	QN		FN		k		fracLeach		EFLeach		FracVolat		EFvolat	
	avant	après	avant	après	avant	après	avant	après	avant	après	avant	après	avant	après
bilan	QN	Q'N	estimation	$0.34 \cdot \exp(0.012 \cdot Q)$	1	1	0.3	0.3	0.0075	0.0075	0.1	0.1	0.01	0.01
			fourchette haute	$1.49 \cdot \exp(0.0082 \cdot Q)$										
			fourchette basse	$1.27 + 0.023 \cdot \exp(0.0175 \cdot Q)$										
ecophyt	QN	Q'N	estimation	$0.34 \cdot \exp(0.012 \cdot Q)$	1	1	0.3	0.3	0.0075	0.0075	0.1	0.1	0.01	0.01
			fourchette haute	$1.49 \cdot \exp(0.0082 \cdot Q)$										
			fourchette basse	$1.27 + 0.023 \cdot \exp(0.0175 \cdot Q)$										
date d'apport	QN	Q'N	estimation	$0.34 \cdot \exp(0.012 \cdot Q)$	1	0.9	0.3	0.27	0.0075	0.0075	0.1	0.1	0.01	0.01
			fourchette haute	$1.49 \cdot \exp(0.0082 \cdot Q)$										
			fourchette basse	$1.27 + 0.023 \cdot \exp(0.0175 \cdot Q)$										
placement	QN	Q'N	estimation	$0.34 \cdot \exp(0.012 \cdot Q)$	1	0.96	0.3	0.3	0.0075	0.0075	0.1	0.066667	0.01	0.01
			fourchette haute	$1.49 \cdot \exp(0.0082 \cdot Q)$										
			fourchette basse	$1.27 + 0.023 \cdot \exp(0.0175 \cdot Q)$										
inhibiteur	QN	Q'N	estimation	$0.34 \cdot \exp(0.012 \cdot Q)$	1	0.8 pour 3/4 Q'N et 1 pour 1/4 Q'N	0.3	0.27 pour 3/4 Q'N et 0.3 pour 1/4 Q'N	0.0075	0.0075	0.1	0.1	0.01	0.01
			fourchette haute	$1.49 \cdot \exp(0.0082 \cdot Q)$										
			fourchette basse	$1.27 + 0.023 \cdot \exp(0.0175 \cdot Q)$										
substitution	QN	Q'N	estimation	$0.34 \cdot \exp(0.012 \cdot Q)$	1 pour Nmin - 0.9 pour Norg	1 pour Nmin - 0.9 pour Norg	0.3	0.3	0.0075	0.0075	0.1 pour Nmin - 0.2 pour Norg	0.1 pour Nmin - 0.2 pour Norg	0.01	0.01
			fourchette haute	$1.49 \cdot \exp(0.0082 \cdot Q)$										
			fourchette basse	$1.27 + 0.023 \cdot \exp(0.0175 \cdot Q)$										

avec : QN, Q'N : quantité d'azote apportée au sol respectivement sans (avant) et avec (après) application de la mesure

FN : fonction reliant l'intensité des émissions de N₂O aux apports d'azote dans les sols

k : coefficient d'efficacité de l'azote

fracLeach : part de l'azote apporté soumise à lixiviation ou ruissellement de surface

EFLeach : facteur d'émission de N₂O de l'azote qui a été soumis à la lixiviation ou au ruissellement

fracVolat : part de l'azote apporté qui est volatilisé sous forme NH₃ ou NO_x

EFVolat : part de l'azote volatilisé qui après redéposition est transformée en N₂O

5.1. Potentiel d'atténuation et coût de la sous-action A1

5.1.a. Potentiel d'atténuation unitaire

- Inventaire des effets sur les émissions

La sous-action "Mieux ajuster la dose d'engrais minéral par un calcul de bilan d'azote" a des conséquences sur les émissions directes sur l'exploitation et sur les émissions indirectes et induites en amont de l'exploitation agricole (Tableau 4).

Tableau 4. Inventaire qualitatif des émissions directes, indirectes et induites par la sous-action

Emissions directes	- émissions de N ₂ O liées aux quantités de fertilisants azoté
Emissions indirectes	- après lixiviation des nitrates à partir des sols - après volatilisation et dépôt d'ammoniac
Emissions induites	- émissions liées à la fabrication et au transport de fertilisants azotés minéraux

- Quantification de l'atténuation

Nous avons appliqué la sous-action A1 à toutes les grandes cultures sauf les betteraves sucrières qui ont montré une baisse significative des quantités de fertilisants azotés apportés depuis 20 ans. Cette sous-action considère une diminution des objectifs de rendements (rendements espérés) pour chaque culture considérée, qui conduit à réduire les besoins en azote et donc à réduire la fertilisation azotée. A l'échelle de la France et compte-tenu des données disponibles sur les écarts entre objectifs de rendements et rendements obtenus, une réduction moyenne de -20 kgN/ha/an est considérée sur les grandes

cultures sauf pour Tournesol (-13 kgN/ha/an). La valeur moyenne de -20 kgN/ha, correspond à peu près à la sous-estimation moyenne sur céréales à l'échelle France, extrapolée à toutes les cultures et toutes les surfaces.

Cette diminution est appliquée à l'ensemble de la sole de ces cultures à l'échelle. Ces valeurs ont été encadrées d'estimations hautes et basses de réduction de la dose d'azote traduisant une incertitude sur l'écart moyen entre objectifs de rendements et rendements réalisés (-10, -30 kgN/ha). Les éléments de calcul sont disponibles en Annexe 1. A partir de la réduction unitaire de la fertilisation minérale, ont été appliqués deux calculs, qui s'appliquent à la quantité d'azote de l'engrais concernée par la mesure.

Calcul "Citepa" :

$$E(N_2O), \text{ les émissions de } N_2O : E(N_2O) = QN \times \text{Frac} \times FE \times FCN-N_2O \times PRG$$

avec : QN : la quantité d'engrais minéral azoté épandue en tonnes de N,

Frac : la proportion d'émissions, FE le facteur d'émissions,

FCN-N₂O : le facteur de conversion (1,57)

PRG : le Pouvoir de Réchauffement Global (310 dans CITEPA 2010).

FracD = 90% et FE1 = 1,25% pour N₂O direct

FracLeac = 30% et FE2 = 2,5 % pour les émissions indirectes par transport et lixiviation hors de la parcelle,

Fracvol = 10% et FE3 = 1,0 % pour les émissions indirectes par déposition après volatilisation

$$E(N_2O) = [(FracD \times EF1 \times QN) + (FracLeach \times EF5 \times QN) + (FracVol \times EF4 \times QN)] \times FCN-N_2O \times PRG$$

$$E(N_2O) = [(0,9 \times 0,0125 \times QN) + (0,3 \times 0,025 \times QN) + (0,1 \times 0,01 \times QN)] \times FCN-N_2O \times PRG$$

Calcul "expert" :

Pour ce second calcul, nous avons combiné deux types de modifications sur le calcul des émissions de N₂O :

1. Pour les émissions directes de N₂O, nous avons introduit les fonctions définies plus haut :

$$E(N_2O) = 158. e^{(0,012.D).k}$$

avec : E(N₂O) en kg eq CO₂

D : dose d'engrais appliquée au sol en kgN/ha

k = 1

La quantité d'engrais apportée est modifiée, nous passons d'une dose QN à une dose Q'N

2. Pour les émissions indirectes de N₂O, les coefficients Frac et FE ne sont pas modifiés par la mesure.

Tableau 5. Calcul de l'atténuation unitaire de la sous-action A1

(kgCO ₂ e/ha/an)	CO ₂ "Citepa"- "expert"	N ₂ O "Citepa" - "expert"	Total "Citepa" - "expert"
Emissions directes			
Moins d'apport azoté et/ou meilleure efficacité		0,108 - 0,192 (0,081-0,161) - (0,148-0,270)	
Emissions indirectes			
Lixiviation Moins d'émissions indirectes du fait du moindre apport et/ou d'une meilleure efficacité		0,072 - 0,021 (0,054-0,107) - (0,015-0,031)	
Volatilisation Moins d'émissions indirectes du fait du moindre apport et/ou d'une meilleure efficacité		0,010 - 0,09 (0,007-0,014) - (0,007-0,014)	
Sous total		0,190 - 0,222 (0,142-0,282) - (0,170-0,315)	
Emissions amont			
Synthèse et transport des fertilisants		0,105 - 0,105 (0,078 - 0,156)	
Synthèse et transport des produits phytos	0,04 - 0,04		
Total			0,299 - 0,331 (0,224-0,442) - (0,244-0,466)

● Conclusion : potentiel d'atténuation unitaire de la sous-action

Le potentiel unitaire total d'atténuation moyenne de la sous-action A1 se situe entre **0,190 et 0,222 MgCO₂e/ha/an** selon le calcul utilisé. Les émissions amont liées à la fabrication et aux transports des engrais correspondent à **0,109 MgCO₂e/ha/an**.

5.1.b. Ligne de base et conditions de développement de l'action

• Situation actuelle

Les données acquises lors de l'enquête "Pratiques culturales" en 2006 (Agreste, 2010) et différentes données issues de travaux montrent que la mise en œuvre des principes de la fertilisation raisonnée (calcul d'un bilan prévisionnel, estimation des stocks d'azote minéral dans les sols, mise en œuvre d'outils de diagnostic de la nutrition azotée) ont peu conduit à diminuer significativement les apports de fertilisants par hectare, sauf dans des situations particulières. Ces mêmes données révèlent une surestimation assez généralisée des rendements espérés (utilisés comme objectif de rendement dans le calcul de la fertilisation azotée) comparés aux rendements moyens réalisés. Cet écart de rendements génère une surestimation des besoins en azote des peuplements qui, elle-même, conduit à une augmentation de la dose de fertilisant, même si les autres postes du bilan (notamment la fourniture d'azote par le sol et les produits organiques) sont bien estimés. Les données du Tableau 6 indiquent un écart entre rendements espérés et rendements réalisés de plus de 10 quintaux dans environ 30% des surfaces de blé tendre, ce qui correspond à un excès de la dose d'azote > 30 kgN par hectare. Nous avons fait l'hypothèse que ces données étaient généralisables aux autres grandes cultures.

Tableau 6. Données sur les écarts entre rendements estimés et rendements réalisés trouvées dans les enquêtes "Pratiques culturales" et la littérature.

Publication	Région et type de culture	Ecart entre rendement estimé et rendement obtenu (q/ha)	Assiette
Agreste Centre 124 (2008)	Blé tendre, Centre	+ 10 q	33% des surfaces
Agreste Picardie 27 (2008)	Blé tendre, Picardie	+ 5 à 10 q + 10 à 15 q > + 15 q	32% des surfaces 15% des surfaces 12% des surfaces
Agreste Picardie 27 (2008)	Blé tendre, France	+ 5 à 10 q + 10 à 15 q > + 15 q	25% des surfaces 14% des surfaces 12% des surfaces
Scheider et al., 2010	Blé tendre, Aisne	+ 15 à 20 q	Préconisation Outil Farmstar vs. Enquête CER 02
Lagarde et Champolivier, 2006	Colza	5 à 6 q (30-40 kg N/ha)	Non précisé

• Conditions nécessaires à la mise en place de l'action (critères de détermination de l'AMT)

Cette sous-action peut être appliquée à l'ensemble des surfaces de grandes cultures de la sole France en faisant l'hypothèse que les écarts entre rendements estimés et rendements réalisés suivent la même tendance dans toutes les régions de France.

• Assiette maximale technique (AMT)

L'assiette maximale technique est constituée de l'ensemble des grandes cultures, et des cultures de maïs fourrage. Nous avons exclu de l'assiette la culture de betteraves, qui montre une baisse régulière de la fertilisation azotée depuis 20 ans. Nous avons modulé l'action pour le tournesol. L'assiette maximale technique représente **11,7 Mha**.

• Scénario de diffusion (% de l'AMT atteint en 2030 et cinétique)

Cette sous-action peut être mise en œuvre sur 100% de l'AMT d'ici 2030. Les critères de facilitation de l'adoption pourront relever de deux facteurs : le renforcement de la réglementation en matière de fertilisation azotée, contraignant les agriculteurs à une mise en œuvre systématique d'un calcul rigoureux de la fertilisation, et l'accroissement du prix des engrais minéraux comparé au prix de vente de la culture. On retient donc un scénario de diffusion rapide liée à des contraintes extérieures (évolution des prix et/ou de la réglementation), avec lequel on atteint 100% de l'AMT en 2020.

5.1.c. Potentiel d'atténuation à l'échelle du territoire français

• Potentiel d'atténuation de l'année 2030 en appliquant la sous-action sur l'AMT

Avec ces hypothèses, une prise en compte d'un rendement plus réaliste a conduit à une économie d'engrais de **230 821** (172 751 000- 344 042 000) **kgN/an**. Cela représente en moyenne **19,7** (14,8 - 29,4) **kgN/ha** pour l'ensemble de ces cultures. Cela représente un potentiel d'atténuation de l'année 2030 équivalent à **2 225 153** (1 663 009 - 3 302 596) **MgCO_{2e}/an** (calcul "Citepa") à **2 599 916** (1 990 929 - 3 689 070) **MgCO_{2e}/an** (calcul "expert"), et **1 273 815** (965 753 - 1 874 453) **MgCO_{2e}/an** d'émissions induites amont.

- **Potentiel d'atténuation cumulé sur la période 2010-2030 en appliquant le scénario de diffusion**

En appliquant le scénario de diffusion proposé ci-dessus, l'atténuation cumulée sur la période 2010-2030 pour cette sous-action est de **32 393 161** (24 209 626 - 48 078 271) **MgCO_{2e}** (calcul "Citepa") à **37 848 852** (28 983 355 - 53 704 452) **MgCO_{2e}** (calcul "expert"), et **18 583 445** (14 662 168 - 27 960 413) **MgCO_{2e}** (émissions induites amont).

5.1.d. Coûts et bénéfices induits par la sous-action

- **Inventaire des modifications induites par la sous-action**

Les modifications sont une baisse de la fertilisation minérale totale, un accompagnement technique accru, par le conseil et/ou par les mesures (analyses de reliquat). On peut considérer que les 2/3 des surfaces qui mettent déjà en œuvre la méthode du bilan, bénéficient déjà de conseils, même si cela ne se traduit pas actuellement sur la dose d'azote. On pourrait donc estimer un coût supplémentaire du conseil pour environ 1/3 des surfaces qui ne le faisait pas (base 2006). Cependant, pour les calculs économiques, on a considéré plus simplement un surcoût des outils de pilotage pour 93% des surfaces n'utilisant pas d'outils de pilotage en 2006. Il n'y a pas de modifications du rendement.

- **Estimations des coûts/bénéfices**

La mise en œuvre systématique d'un outil de pilotage de la fertilisation azotée de type Farmstar (10 €/ha) sur les 93% de l'AMT n'en bénéficiant pas engendre un coût moyen de 9,3 €/ha, tandis qu'une réduction moyenne de 19,8 kgN/ha sous forme ammonitrate engendre un gain moyen de 18,03 €/ha. Le coût unitaire moyen de la sous-action A1 est donc de -8,73 €/ha ; il s'agit donc d'un gain net.

- **Conclusions : coût unitaire de la sous-action, coût annuel pour l'AMT en 2030 et coût cumulé sur la période 2010-2030**

Tableau 7.

Coût unitaire (€/ha/an)	AMT 2030 (ha)	Coût AMT 2030 (€/an)	Coût cumulé 2010-2030 (€)
-8,73 (-4,14 à -17,46)	11 711 333	-101 362 453 (-48 460 565 à -204 506 825)	-1 475 606 339 (-705 475 395 à 2 977 153 362)

5.1.e. Synthèse et discussion : récapitulatif de l'atténuation escomptée, du coût, et du coût de la tonne de CO_{2e} évité

L'atténuation unitaire moyenne a été estimée à 0,190 MgCO_{2e}/ha/an (0,222 MgCO₂ avec le calcul "expert") pour les émissions directes et indirectes liées à l'exploitation agricole, et 0,109 MgCO_{2e}/ha/an d'émissions amont induites. En appliquant cette atténuation sur l'assiette maximale technique, l'atténuation annuelle est de 2 225 153 MgCO_{2e}/an (calcul "Citepa") à 2 599 916 MgCO_{2e}/an (calcul "expert"), et 1 273 815 MgCO_{2e}/an d'émissions induites amont. L'atténuation cumulée sur la période 2010-203 est de 32 393 161 MgCO_{2e} (calcul "Citepa") à 37 848 852 MgCO_{2e} (calcul "expert"), et 18 583 445 MgCO_{2e} d'émissions induites amont. Le coût unitaire est de -8,73 €/ha/an, et le coût d'atténuation est de -45,89 €/MgCO_{2e} (calcul "Citepa") et -39,29 €/MgCO_{2e} (calculé "expert"), hors émissions induites amont.

Nous pouvons comparer ces résultats à ceux obtenus en extrapolant les résultats obtenus avec l'outil Epiclès® par la coopérative *InVivo* (Tableau 8). Cette coopérative a estimé les réductions de fertilisation minérale permise par la mise en œuvre de l'outil, par rapport aux données sur les pratiques agricoles Agreste pour les mêmes cultures (voir Annexe 1). Ce second calcul nous semble intéressant, mais moins robuste car il s'appuie sur une seule étude à partir de laquelle nous extrapolons les résultats à l'échelle de la France entière. Il a cependant l'intérêt de permettre d'évaluer l'amélioration possible en mettant en œuvre le bilan d'azote et les outils d'accompagnement pour le pilotage de la fertilisation azotée. Nous avons considéré son assiette d'application avec une valeur basse constituée par l'augmentation potentielle des surfaces concernées par une estimation des reliquats azotés (+40% des surfaces en 2006), et une valeur haute constituée par l'augmentation potentielle des surfaces avec pilotage de la fertilisation azotée (+93% des surfaces en 2006). Le potentiel d'atténuation est alors de **1,6 à 12,9 kgN/ha sur 12 Mha** selon l'une ou l'autre des deux hypothèses. En considérant la généralisation de cette démarche, le potentiel d'atténuation représenterait environ 65% de celui calculé en utilisant l'hypothèse de calcul de la dose d'azote avec des rendements plus réalistes.

Tableau 8. Ecart entre la dose moyenne recommandée par l'outil Epiclès et la dose moyenne pratiquée sur les mêmes cultures à l'échelle France (d'après Berthoud, 2010)

Culture	Surface de l'échantillon (ha)	Dose moyenne réalisée sous Epiclès (kgN/ha)	Dose Agreste 2006 moyenne nationale (kgN/ha)	Moyenne Epiclès - moyenne Agreste (kgN/ha)
Betterave sucrière	18 257	95	108	-13
Blé tendre	562 537	160	165	-5
Colza	215 608	146	165	-19
Mais grain	123 812	131	156	-25
Orge	187 486	119	130	-11
Pomme de terre	4 590	135	159	-24
Tournesol	77 789	32	56	-24

5.2. Potentiel d'atténuation et coût de la sous-action A2

5.2.a. Potentiel d'atténuation unitaire

- Inventaire des effets sur les émissions

La sous-action "Réduire la fertilisation azotée dans le cadre d'une réduction d'intrants phytosanitaires" a des conséquences sur les émissions directes sur l'exploitation agricole et sur les émissions indirectes et induites en amont de l'exploitation agricole (Tableau 9).

Tableau 9. Inventaire qualitatif des émissions directes, indirectes et induites par la sous-action

Emissions directes	- émissions de N ₂ O liées aux quantités de fertilisants azoté - émissions de CO ₂ liées à l'utilisation des engins agricoles - émissions liées à l'usage des pesticides
Emissions indirectes	- après lixiviation des nitrates à partir des sols - après volatilisation et dépôt d'ammoniac
Emissions induites	- émissions liées à la fabrication et au transport de fertilisants azotés minéraux - émissions liées à la fabrication et au transport des pesticides

- Quantification de l'atténuation

La sous action 1.2 estime la réduction des émissions de gaz à effet de serre, associée à la mise en œuvre de l'un des scénarios proposés de réduction de l'usage des produits phytosanitaires en France. Le calcul est appliqué à toutes les grandes cultures, le maïs fourrage, le riz. Cette sous-action considère une diminution des intrants phytosanitaire de 30% ce qui entraînent une baisse des rendements de 6% en moyenne en grandes cultures. (Rapport Ecophyto Grandes Cultures INRA, 2010). Les diminutions d'azote induites par la diminution des rendements utilisées sont celles proposées dans le cadre de l'étude Ecophyto. On applique les réductions moyennes de fertilisation azotée à toutes les surfaces de chaque culture. Les écarts types sur les rendements obtenus dans l'étude Ecophyto R&D ($\pm 21\%$ en moyenne) sont utilisés pour estimer une valeur basse et haute autour de la réduction de la fertilisation azotée, et donc de l'atténuation moyenne. On utilise les données statistiques sur les matières actives pour calculer l'impact via la réduction de pesticides.

Les éléments de calcul sont disponibles en annexe 2. A partir de la réduction unitaire de la fertilisation minérale, ont été appliqués les deux calculs, qui s'appliquent à la quantité d'azote de l'engrais concernée par la mesure.

Calcul "Citepa" :

$$E(N_2O) = QN \times \text{Frac} \times FE \times \text{FCN-N}_2O \times \text{PRG}$$

avec : QN la quantité d'engrais minéral azoté non épandue en tonnes de N ; Frac la proportion d'émissions ; FE le facteur d'émissions ; FCN-N₂O le facteur de conversion (1,57) et PRG le Pouvoir de Réchauffement Global (310 dans CITEPA 2010)

Frac = 90% et FE = 1,25% pour N₂O direct

Frac = 20% et FE = 1,0% pour les émissions indirectes par déposition après volatilisation

Frac = 30% et FE = 2,5% pour les émissions indirectes par transport et lixiviation hors de la parcelle

Calcul "expert" :

1. Pour les émissions directes de N₂O, nous avons introduit les fonctions définies plus haut :

$$E(N_2O) = 158. e^{(0,012 \cdot D) \cdot k} \quad \text{avec : } E(N_2O) \text{ en kg eq CO}_2; D : \text{dose d'engrais appliquée au sol en kgN/ha ; } k = 1$$

La quantité d'engrais apportée est modifiée, nous passons d'une dose QN à une dose Q'N

2. Pour les émissions indirectes de N₂O, les coefficients Frac et FE ne sont pas modifiés par la mesure.

Tableau 10. Calcul de l'atténuation unitaire de la sous-action A2

(kgCO ₂ e/ha/an)	CO ₂ "Citepa" - "expert"	N ₂ O "Citepa" - "expert"	Total "Citepa" - "expert"
Emissions directes			
Moins d'apport azoté et/ou meilleure efficacité Moins de fuel du fait de la réduction des épandages	0,001 - 0,001	0,056 – 0,104 (0,044-0,0068) - (0,082-0,126)	
Emissions indirectes			
Lixiviation Moins d'émissions indirectes du fait du moindre apport et/ou meilleure efficacité		0,038 – 0,011 (0,030-0,046) - (0,009-0,013)	
Volatilisation Moins d'émissions indirectes du fait du moindre apport et/ou d'une meilleure efficacité		0,005 – 0,005 (0,004-0,006)	
Sous total			0,100 - 0,120 (0,079-0,121) - (0,095-0,145)
Emissions amont			
Synthèse et transport des fertilisants		0,055 - 0,055 (0,043 - 0,067)	
Synthèse et transport des produits phytos	0,005 - 0,005 (0,004 - 0,006)		
Total			0,160 - 0,181 (0,126-0,194) - (0,143-0,219)

- **Conclusion : potentiel d'atténuation unitaire de la sous-action A2**

Le potentiel unitaire d'atténuation moyen de cette sous-action se situe entre **0,100 et 0,120 MgCO₂e/ha/an** selon le calcul utilisé, et une atténuation de **0,060 MgCO₂e/ha/an** correspondant aux émissions induites amont. Ce potentiel correspond à une diminution moyenne de 10,3 kgN/ha équivalente, soit 7% de la fertilisation sur les surfaces considérées, une diminution de 0,58 kg matières actives /ha et une réduction du nombre de passages de 0,31 /ha.

5.2.b. Ligne de base et conditions de développement de la sous-action

- **Situation actuelle**

Cette option technique correspond à la mise en place d'un scénario de réductions d'intrant. Le plan Ecophyto 2018 vise à réduire progressivement l'utilisation des produits phytosanitaires (communément appelés pesticides) en France tout en maintenant une agriculture économiquement performante. Initiative lancée en 2008 à la suite du Grenelle Environnement, ce plan est piloté par le ministère chargé de l'agriculture. À la suite du Grenelle de l'environnement, le plan Ecophyto 2018 constitue l'engagement des parties prenantes à réduire de 50% l'usage des pesticides au niveau national dans un délai de dix ans, si possible. Le NODU est un indicateur "toutes cultures", calculé annuellement à partir des données de ventes de pesticides transmises par les distributeurs dans le cadre de la déclaration au titre de la redevance pour pollutions diffuses. Cet indicateur est utilisé pour le suivi du plan Ecophyto 2018. En 2010, la réduction de l'usage des substances actives dans le cadre de ce plan n'était pas encore perceptible.

- **Conditions nécessaires à la mise en place de l'action (critères de détermination de l'AMT)**

Cette sous-action peut être appliquée à l'ensemble des surfaces de grandes cultures de la sole France. Nous avons conservé les cultures pour lesquelles un effet de la réduction des phytosanitaires sur la fertilisation azotée était observé. Au sein des scénarios de réduction de l'usage des pesticides de l'étude Ecophyto R&D, nous avons choisi le scénario "2a", correspondant à une diminution d'un tiers de l'usage des pesticides qui conduit à une baisse modérée des rendements et ne remet pas en cause les systèmes de culture.

- **Assiette maximale technique (AMT)**

L'assiette maximale technique ici est constituée de l'ensemble des grandes cultures et de la culture de maïs fourrage. L'AMT représente **12,1 Mha et 124 600 kgN/an**.

- Scénario de diffusion (% de l'AMT atteint en 2030 et cinétique)

Cette sous-action peut être mise en œuvre sur 100% de l'AMT d'ici 2030. Les critères de facilitation de l'adoption pourront relever de deux facteurs : la réussite du plan Ecophyto 2018, résultant des différents axes de ce plan (formation, information et accompagnement, démonstration, etc.) et éventuellement l'accroissement de la réglementation en matière d'usage des pesticides. Nous choisissons un scénario (optimiste) et rapide de diffusion conduisant à 100% de l'AMT d'ici 2020.

5.2.c. Potentiel d'atténuation à l'échelle du territoire français

- Potentiel d'atténuation de l'année 2030 en appliquant la sous-action sur l'AMT

En considérant les surfaces concernées, cette sous-action concerne **124 627 000** (98 189 000-150 319 000) **kgN** sous forme de fertilisant minéral de synthèse économisé par an, ce qui représente en moyenne une réduction de la fertilisation minérale de **10,3 kgN/ha/an (8,1-12,4) pour ces cultures**. Le potentiel d'atténuation représente **1 209 479** (956 121 – 1 457 350) (calcul "Citepa") à **1 451 699** (1 163 629 - 1 736 630) **MgCO_{2e}/an** (calcul "expert"), et **730 214** (576 869 – 883 559) **MgCO_{2e}/an** d'émissions induites amont.

- Potentiel d'atténuation cumulé sur la période 2010-2030 en appliquant le scénario de diffusion

En appliquant le scénario de diffusion proposé ci-dessus, l'atténuation cumulée sur la période 2010-2030 pour cette sous-action est de **15 913 825** (12 577 443 - 19 170 931) **MgCO_{2e}** (calcul "Citepa") à **19 096 590** (15 307 133 - 22 844 754) **MgCO_{2e}** (calcul "expert"), et **1 145 795** (7 479 498 - 11 617 092) **MgCO_{2e}** pour les émissions induites amont.

5.2.d. Coûts et bénéfices induits par la sous-action

- Inventaire des modifications induites par la sous-action

Les modifications sont une baisse de l'apport de pesticides, une baisse de la quantité d'azote minéral apporté par les engrais, une baisse des rendements, une réduction du passage d'engins agricoles (lié aux pesticides), un accompagnement technique accru dans le cadre du plan Ecophyto 2018 et du conseil de fertilisation.

Le rendement et le prix du maïs fourrage n'étant pas fourni dans la SAA et le RICA, nous avons utilisé les tables d'équivalence Arvalis entre rendement grain et rendement fourrage. Nous avons ainsi estimé le rendement du maïs fourrage à 14,5 t MS/ha et son prix à 100,7 €/tonne, pour la France en 2010.

- Estimations des coûts/bénéfices

Tableau 11.

	unités/ha	€/unités	€/ha
Fertilisation	-10,30	0,911	-9,38
Passages	-0,315	9,073	-2,86
Phytosanitaires			-52,46
Surveillance	0,25	17,00	4,25
Perte de rendement			73,04
Coût unitaire			12,58

La sous-action A2 coûte en moyenne **12,58 €/ha**.

- Conclusions : coût unitaire de la sous-action, coût annuel pour l'AMT en 2030 et coût cumulé sur la période 2010-2030

Tableau 12.

Coût unitaire (€/ha/an)	AMT 2030 (ha)	Coût AMT 2030 (€/an)	Coût cumulé 2010-2030 (€)
12.58 (-0,76 à 25,86)	12 097 490	152 219 191 (-9 247 320 à 312 849 765)	2 002 390 169 (-121 645 258 à 4 115 429 146)

5.2.e. Synthèse et discussion: récapitulatif de l'atténuation escomptée, du coût, et du coût de la tonne de CO₂e évité

L'atténuation unitaire moyenne a été estimée à 0,100 MgCO₂e/ha/an (0,120 MgCO₂ avec le calcul "expert") pour les émissions directes et indirectes liées à l'exploitation agricole, et 0,060 MgCO₂e/ha/an d'émissions amont induites.

En appliquant cette atténuation sur l'assiette maximale technique, l'atténuation annuelle moyenne est de 1 209 749 (calcul "Citepa") à 1 451 699 MgCO₂e/an (calcul "expert"), et 730 214 MgCO₂e/an d'émissions induites amont.

L'atténuation cumulée moyenne sur la période 2010-203 est de 15 913 825 MgCO₂e (calcul "Citepa") à 19 096 590 MgCO₂e (calcul "expert"), et 1 145 795 MgCO₂e pour les émissions induites amont.

Le coût unitaire est de 12,58 €/ha/an, et le coût d'atténuation est de 125,77 €/MgCO₂e (calcul "Citepa") et 104,45 €/MgCO₂e (calculé "expert"), hors coût de transaction et émissions induites amont.

5.3. Potentiel d'atténuation et coût de la sous-action B

5.3.a. Potentiel d'atténuation unitaire

- Inventaire des effets sur les émissions

La sous-action "**Améliorer la valorisation des produits organiques apportés**" a des conséquences sur les émissions directes sur l'exploitation agricole et sur les émissions indirectes et induites en amont de l'exploitation agricole (Tableau 13).

Tableau 13. Inventaire qualitatif des émissions directes, indirectes et induites par la sous-action

Emissions directes	- émissions de N ₂ O liées aux quantités de fertilisant azoté et de produits organiques
Emissions indirectes	- après lixiviation de nitrate à partir des sols - après volatilisation et dépôt d'ammoniac
Emissions induites	- émissions liées à la fabrication et au transport de fertilisants azotés minéraux

- Quantification de l'atténuation

La sous-action est appliquée à toutes les grandes cultures (blé tendre et blé dur, colza, orge, maïs grain et maïs fourrage, tournesol, betterave, pomme de terre). Elle considère trois hypothèses :

(i) La prise en compte incomplète de la fourniture d'azote des apports organiques existants, dans le calcul de la dose prévisionnelle d'azote minéral à apporter sur les cultures. L'hypothèse est que cela concerne 33% des quantités totales de l'azote organique apporté à ces cultures. Cette quantité est calculée à l'échelle de la sole France de ces cultures, en utilisant les données statistiques sur la fertilisation organique et minérale des cultures, et en utilisant un coefficient d'équivalence engrais des produits organiques (source COMIFER adapté AzoFert®). Les fourchettes hautes et basses données pour cette estimation sont les bornes inférieures et supérieures des valeurs de Keq utilisées par AzoFert® (N. Damay, Laboratoire Départemental d'Analyse et de Recherche, communication personnelle).

(ii) Les pertes d'azote par volatilisation d'ammoniac aux dépens des effluents d'élevage. La volatilisation est estimée en tenant compte des fourchettes basses et hautes de la composition des effluents d'élevage (fraction ammoniacale) (Beline et al. ; 2012), des fourchettes basses et hautes de volatilisation de l'ammoniac (Beline et al., 2009), de la proportion de situations avec enfouissement des effluents et de la réduction de la volatilisation permise par l'incorporation des effluents (Citepa, 2012). On en déduit la réduction possible de la fertilisation minérale en tenant compte des estimations moyennes de l'azote économisé en modifiant les épandages des effluents (enfouissement systématique).

(iii) L'existence d'un volume de déchets organiques non animaux (boues de STEP, effluents agro-industriels, composts urbains) non recyclés actuellement sur les sols agricoles et qui sont disponibles. Ces volumes sont chiffrés à environ 2,3 fois les volumes actuellement recyclés (Ademe, 2007 ; UNIFA, 2010). On calcule à partir des coefficients d'équivalence engrais de ces produits organiques (adapté du COMIFER, 2012), la quantité d'engrais minéral économisé.

Il n'a pas été estimé dans cette sous-action la possibilité de réorganisation de plan d'épandage liée à la meilleure prise en compte des produits organiques qui conduirait à une répartition de l'azote sur plus de surfaces. Cette réorganisation pourrait induire des émissions supplémentaires liées au transport, voire à des stockages plus longs, particulièrement pour les zones en excédent structurel.

Ces trois calculs sont additifs et sont combinés. Les éléments de calcul sont disponibles en Annexe 3. A partir de la réduction unitaire de la fertilisation minérale, ont été appliqués les calculs "Citepa" et "expert".

Calcul "Citepa" :

$$E(N_2O) = QN \times \text{Frac} \times \text{FE} \times \text{FCN-N}_2\text{O} \times \text{PRG}$$

avec : QN la quantité d'engrais minéral azoté non épanché en tonnes de N, Frac la proportion d'émissions, FE le facteur d'émissions, FCN-N₂O le facteur de conversion (1,57) et PRG le Pouvoir de Réchauffement Global (310 dans CITEPA 2010).

Frac = 90% et FE = 1,25% pour N₂O direct

Frac = 20% et FE = 1,0% pour les émissions indirectes par déposition après volatilisation

Frac = 30% et FE = 2,5% pour les émissions indirectes par transport et lixiviation hors de la parcelle

Calcul "expert" :

Pour les émissions directes de N₂O, nous avons introduit les fonctions définies plus haut :

$$E(N_2O) = 158 \cdot e^{(0,012 \cdot D) \cdot k}$$

avec : E(N₂O) en kg eq CO₂

D : dose d'engrais appliquée au sol en kgN/ha ; k = 1

Comme suggéré dans la méthodologie IPCC, nous traitons différemment l'azote minéral et l'azote organique, plus vulnérable à la volatilisation et par voie de conséquence moins disponible pour être transformé en N₂O à la parcelle. Ainsi, FracVol est doublé pour l'azote organique et k est ramené à 0,9.

Les coefficients décrivant les émissions liées à la lixiviation ne sont pas affectés par la mesure.

Tableau 14. Calcul de l'atténuation unitaire de la sous-action 2

(kgCO ₂ e/ha/an)	CO ₂ "Citepa" - "expert"	N ₂ O "Citepa" - "expert"	Total "Citepa" - "expert"
Emissions directes Moins d'apport azoté et/ou meilleure efficacité		0,079 – 0,136 (0,054-0,122) - (0,094-0,204)	
Emissions indirectes Lixiviation Moins d'émissions indirectes du fait du moindre apport et/ou d'une meilleure efficacité		0,052 – 0,015 (0,036-0,081) - (0,010-0,023)	
Volatilisation Moins d'émissions indirectes du fait du moindre apport et/ou d'une meilleure efficacité		0,007 – 0,005 (0,005-0,011) - (0,010-0,023)	
Sous total			0,138 - 0,156 (0,094-0,214) – (0,107-0,236)
Emissions amont Synthèse et transport des fertilisants		0,076 - 0,076 (0,052-0,118)	
Total			0,215-0,232 (0,147-0,332) - (0,159-0,354)

- Conclusion : potentiel d'atténuation unitaire de la sous-action

Le potentiel unitaire d'atténuation de cette sous-action se situe entre **0,138 et 0,156 MgCO₂e/ha/an** selon le calcul utilisé. Les émissions amont liées à la fabrication et au transport des engrais correspondent à **0,076 MgCO₂e/ha/an**.

5.3.b. Ligne de base et conditions de développement de l'action

- Situation actuelle

Il existe une forte incertitude sur les quantités d'azote épanchées au sol sous forme organique, sur la composition de ces effluents et sur la disponibilité réelle de cet azote apporté pour les cultures (dynamique de minéralisation). En 2010, environ 1380 000 tonnes d'azote sous forme d'effluents d'élevage (lisiers, fumiers, fientes) étaient disponibles, dont environ 50% excrétés directement à la parcelle par les élevages. Les lisiers représentaient 47% et les fumiers 53% du total de l'azote disponible. La totalité des effluents est recyclée (80% épanchés sur les sols agricoles, 20% traités biologiquement). Le volume total de ces effluents a baissé de 8% en 20 ans environ (UNIFA, 2010). Pour les produits organiques (déchets urbains, agro-industriels, verts), environ 90 000 tonnes N /an sont recyclées vers les sols agricoles, ce qui représente seulement 2% de la quantité totale d'azote apportée sur les cultures (UNIFA, 2010). La ressource actuelle disponible est estimée environ 2,3 fois plus importante (environ 185 000 tonnes N /an) (Ademe, 2007) ; une partie de ces déchets n'est pas utilisable pour la

fertilisation azotée, étant donné leur très faible teneur en azote, conférant à ces déchets un caractère d'amendements mais pas de fertilisants (boues de papeteries et boues agro-industrielles notamment). Au vu de ces ordres de grandeur, il n'existe pas de "réserve" très importante de matières organiques résiduelles supplémentaires, qui pourraient se substituer à la fertilisation minérale de manière très conséquente, indépendamment de toute autre considération (de transport, d'innocuité, de réglementation notamment sur le phosphore), et donc une marge de progrès importante réside, comme pour la fertilisation minérale, dans la gestion de ces produits, plutôt que dans l'accroissement de leur recyclage.

À l'échelle France, en moyenne 81% des surfaces ne reçoivent que de l'azote minéral et 19% des surfaces combinent N minéral et N organique (Agreste, 2010). En fait, les céréales reçoivent peu d'apports organiques en raison des difficultés techniques à apporter du N organique au bon moment, en relation avec les besoins de la culture (à l'automne faibles besoins et risques de lixiviation, au printemps forts besoins mais difficultés ou impossibilités d'apporter les engrais organiques, etc.) (Chambres d'Agriculture de Bretagne et al., 2012). Les cultures qui reçoivent le plus souvent de l'azote organique sont les cultures de printemps (maïs grain et maïs fourrage, betterave, pomme de terre, tournesol), car il est possible d'apporter et parfois d'enfourer (notamment le fumier) avant le semis, et dans de bonnes conditions. Dans les zones d'élevage, les surplus d'azote sont importants, en raison des difficultés des agriculteurs à connaître avec précision les volumes et la composition des produits organiques épandus. Ceci les conduit à conserver une fertilisation minérale même dans les situations où cela ne serait pas nécessaire pour pallier l'incertitude quant à aux doses apportées et à l'azote disponible.

Pour les effluents d'élevage, actuellement plus de 90% des lisiers recyclés sur les sols agricoles sont épandus à la surface du sol, ce qui donne une marge de progrès considérable pour réduire la volatilisation, en développant les techniques d'enfouissement. La plupart des agriculteurs confient les épandages à des entreprises, c'est donc au niveau des entreprises que peut s'effectuer l'évolution des techniques d'épandage.

- **Conditions nécessaires à la mise en place de l'action (critères de détermination de l'AMT)**

Les conditions sont identiques à celles des autres sous-actions. Nous avons considéré toutes les grandes cultures concernées par la fertilisation organique (la réduction de la volatilisation n'a pas été estimée sur la totalité des effluents animaux épandus en France ni sur la totalité des surfaces de toutes les cultures de France, mais sur celles concernées par l'action). Les possibilités d'épandage (surfaces) sont considérées non limitantes aux échelles régionales, et les transferts intra-régionaux entre surfaces réceptrices ne sont pas considérés ici.

- **Assiette maximale technique (AMT)**

L'assiette maximale technique ici est constituée de l'ensemble des grandes cultures et du maïs fourrage. L'assiette maximale technique représente **12,0 Mha**.

- **Scénario de diffusion (% de l'AMT atteint en 2030 et cinétique)**

Cette sous-action peut être mise en œuvre sur 100% de l'AMT en 2030. Les critères de facilitation de l'adoption pourront relever de deux facteurs : l'accroissement du prix des engrais minéraux (augmentation du prix de l'énergie ou instauration de taxes) et l'amélioration des techniques de pesée, caractérisations chimiques rapides et techniques d'épandage (régularité, enfouissement). Plusieurs projets sont en cours sur ces sujets (projets CASDAR), pour faciliter la prise en compte par les agriculteurs.

5.3.c. Potentiel d'atténuation à l'échelle du territoire français

- **Potentiel d'atténuation de l'année 2030 en appliquant la sous-action sur l'AMT**

Avec ces hypothèses, une meilleure valorisation des produits organiques, via les trois options examinées, conduit à une économie d'engrais azoté minéral de 176 957 210 kgN/an.

La première option (meilleure prise en compte de N organique dans le calcul du bilan) porte sur un volume de 424 394 848 kgN/an, équivalent à 61 342 031 kg N minéral par an, et contribue à une réduction de 4,8 kgN/ha/an (4,2-5,4) pour l'assiette considérée. L'incertitude est associée aux valeurs du coefficient d'équivalence engrais de l'azote organique. Nous avons choisi les valeurs hautes et basses utilisées dans le logiciel AzoFert® pour ces types de produits (($K_{eq} = 0,65$ pour les lisiers apportés au printemps, 0,25 pour les fumiers, et 0,3 en moyenne pour les autres déchets non animaux).

La deuxième option (réduction des pertes par volatilisation) porte sur un volume de 424 394 848 kgN/an, équivalent en moyenne à 88 393 178 kg N minéral (40 402 390 - 176 272 400), et contribue à une réduction de 7,3 kgN/ha/an pour l'assiette considérée (3,3-14,6). Il y a une incertitude liée au caractère variable de la volatilisation et à la variabilité de la composition des effluents dont nous avons tenu compte pour déterminer les valeurs basses et hautes autour de la moyenne, associées à cette option.

La troisième option (augmentation du volume de déchets recyclés) porte sur un volume de 90 740 000 kgNorg/an, équivalent à 27 222 000 kg N minéral, et contribue à une réduction de 2,3 kgN/ha/an pour l'assiette considérée.

Comme signalé précédemment, cela ne représente pas la totalité des apports d'effluents car seuls les apports sur les grandes cultures sont considérés. Le volume de produits organiques épandus sur ces sols est de 424 400 kgN/an pour cette option, ce qui représente 61% de la totalité des produits organiques recyclés en 2010 vers les sols d'après les données UNIFA (2010). Nous n'avons pas associé d'incertitude à cette option.

L'économie d'engrais minéral est au total de 14,4 kgN/ha (9,8-22,2), équivalente à une baisse de 10,0% de la fertilisation sur les surfaces considérées.

Ceci se traduit par un potentiel d'atténuation de l'année 2030 équivalent à **1 666 345** (1 135 047 - 2 584 043) MgCO_{2e}/an (calcul "Citepa") ou **1 883 695** (1 292 022 - 2 849 692) MgCO_{2e}/an (calcul "expert"), et **921 298** (629 559 - 1 424 646) MgCO_{2e}/an d'émissions induites amont.

- **Potentiel d'atténuation cumulé sur la période 2010-2030 en appliquant le scénario de diffusion**

En appliquant le scénario de diffusion proposé ci-dessus, l'atténuation cumulée sur la période 2010-2030 pour cette sous-action est de **22 256 014** (15 159 894 - 34 512 950) MgCO_{2e} (calcul "Citepa") à **25 158 973** (17 256 475 - 38 061 010) MgCO_{2e} (calcul "expert") d'émissions directes et indirectes, et **12 256 935** (8 386 324 - 19 030 505) MgCO_{2e} d'émissions induites amont.

5.3.d. Coûts et bénéfices induits par la sous-action

- **Inventaire des modifications induites par la sous-action**

Les modifications sont une réduction de la quantité d'azote apportée sous forme d'engrais minéral, une modification des techniques d'épandage des effluents, un accompagnement technique accru dans le cadre du conseil de fertilisation. Il n'y a pas de diminution des rendements.

- **Estimations des coûts/bénéfices**

La sous-action engendre une diminution moyenne de la dose d'azote minéral apportée de 14,65 kgN/ha, soit un gain de 13,35 €/ha. Le surcoût de l'enfouissement des effluents est de 1,51 €/ha. Nous faisons l'hypothèse simplificatrice que le matériel d'origine pour épandre les lisiers est une tonne de 10-11 m³ avec une rampe à buses de 12 m, et que l'on passe à une rampe de 12 m avec pendillards et broyeurs intégrés. La sous-action B engendre un bénéfice moyen de **11,6 €/ha**.

- **Conclusions : coût unitaire de la sous-action, coût annuel pour l'AMT en 2030 et coût cumulé sur la période 2010-2030**

Tableau 15.

Coût unitaire (€/ha/an)	AMT 2030 (ha)	Coût AMT 2030 (€/an)	Coût cumulé 2010-2030 (€)
-11,59 (-7,44 à -18,75)	12 074 969	-142 961 927 (-89 864 760 à -226 400 922)	-1 909 425 254 (-1 200 249 928 à -3 023 851 513)

5.3.e. Synthèse et discussion: récapitulatif de l'atténuation escomptée, du coût, et du coût de la tonne de CO_{2e} évité

L'atténuation unitaire a été estimée à 0,138 MgCO_{2e}/ha/an (0,156 MgCO_{2e} avec le calcul "expert") pour les émissions directes et indirectes liées à l'exploitation agricole, et 0,076 MgCO_{2e}/ha/an d'émissions induites amont.

En appliquant cette atténuation sur l'assiette maximale technique, l'atténuation annuelle est de **1 666 345** MgCO_{2e}/an (calcul "Citepa") à **1 883 695** MgCO_{2e}/an (calcul "expert"), et **921 298** MgCO_{2e}/an d'émissions induites amont.

L'atténuation cumulée sur la période 2010-2030 est de **22 256 014** MgCO_{2e} (calcul "Citepa") à **25 158 973** MgCO_{2e} (calcul "expert"), et **12 256 935** MgCO_{2e} d'émissions induites amont.

Le coût unitaire est de -11,59 €/ha/an, et le coût d'atténuation est de -83,8 €/MgCO_{2e} (calcul "Citepa") et -74,3 €/MgCO_{2e} (calculé "expert"), hors coût de transaction et émissions induites amont.

Cette sous-action repose sur trois leviers qui conduisent tous les trois à une possibilité de diminuer la quantité d'azote minéral apporté en complément de la fertilisation organique, soit sur les mêmes surfaces, soit sur des surfaces proches sauf en zones d'excédent structurel, et notamment cultivées en céréales recevant pour l'instant peu d'apports organiques en moyenne. Ce calcul est très sensible au coefficient Keq qui traduit la proportion de l'azote total du produit qui est effectivement absorbé par la culture. Ce pourcentage dépend de la nature chimique du produit, qui détermine notamment sa minéralisation potentielle, et des conditions d'apport (notamment date d'apport), qui conditionnent la part de l'azote minéralisé absorbée par la plante. Nous nous sommes volontairement placés dans des ordres de grandeur du Keq (équivalent engrais) qui font consensus et sont proposés comme références par le COMIFER et utilisés dans des outils comme AzoFert® (Keq = 0,65 pour les lisiers apportés au printemps, 0,25 pour les fumiers, et 0,3 en moyenne pour les autres déchets non animaux). Les quantités totales d'azote mis en jeu sont bien supérieures et entrent en compte dans les surplus d'azote calculés par ailleurs (par exemple, Observations et Statistiques, n°448, 2013). Par exemple, une augmentation de 0,1 seulement de la valeur Keq conduit à augmenter l'atténuation unitaire de 13% environ sans changer aucune autre hypothèse de ces calculs. Le calcul est donc très sensible à la traduction en "équivalent engrais" de l'azote organique. Ceci souligne d'une part l'importance d'améliorer la valorisation des produits organiques grâce aux pratiques culturales (notamment dates d'apport des engrais organiques), et d'autre part l'importance de bien estimer ces paramètres utilisés dans les outils de raisonnement de la fertilisation azotée. A long terme, une meilleure conservation de l'azote (réduction de la volatilisation) et un recyclage accru des déchets conduiront à une augmentation lente mais effective de l'azote organique minéralisable, et donc permettront une réduction supplémentaire des apports d'azote. Par exemple, l'outil AzoFert® considère une augmentation de la minéralisation de l'azote de 10% pour les situations avec restitutions systématiques de résidus de culture et des fréquences d'apport organique tous les 2-3 ans.

L'autre aspect à souligner est l'importance de la maîtrise de la volatilisation d'ammoniac qui doit être menée *via* le développement et l'utilisation des équipements adaptés.

5.4. Potentiel d'atténuation et du coût de la sous-action C1

5.4.a. Potentiel d'atténuation unitaire

• Inventaire des effets sur les émissions

La sous-action "**Ajuster les dates d'apport aux besoins des cultures**" a des conséquences sur les émissions directes sur l'exploitation agricole et sur les émissions indirectes et induites en amont de l'exploitation agricole

Tableau 16. Inventaire qualitatif des émissions directes, indirectes et induites par la sous-action C1

Emissions directes	- émissions de N ₂ O liées aux quantités de fertilisant azotés économisées - émissions liées à l'usage des engins agricoles (épandage)
Emissions indirectes	- après lixiviation des nitrates à partir des sols - après volatilisation et dépôt d'ammoniac
Emissions induites	- émissions liées à la fabrication et au transport de fertilisants azotés minéraux - émissions liées aux carburants des engins agricoles

• Quantification de l'atténuation

Cette sous-action a pour objectif de chercher un meilleur ajustement des apports d'azote aux besoins des cultures. Elle fait l'hypothèse que dans un certain nombre de situations, le premier apport peut être supprimé car le reliquat d'azote à la sortie d'hiver est supérieur aux besoins du peuplement à cette période. Le fait de supprimer ce premier apport conduit à améliorer en moyenne l'efficacité de l'azote apporté sur la culture (l'absorption par les cultures de l'azote apporté à des dates ultérieures est supérieure), et permet alors de diminuer la dose totale.

Cette sous-action a été appliquée aux céréales d'hiver (blé tendre et blé dur, orge) et colza, mais pour le colza cette situation correspond à un très faible pourcentage des surfaces (voir Annexe 4). Pour estimer les surfaces concernées, nous avons utilisé les données des mesures de reliquats sorties d'hiver réalisées par le Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherches de l'Aisne, pendant 8 ans (2005 à 2012) concernant environ 10 000 parcelles de blé d'hiver, 600 d'orge et 400 de colza. Ces données ont permis de calculer la proportion de situations avec un reliquat supérieur à 50 kgN/ha (besoins définis sur la base des fiches "cultures" du COMIFER) et pour lesquelles le premier apport d'azote pourrait donc être décalé dans le temps. Nous avons réduit la fertilisation totale en tenant compte d'un critère d'amélioration de l'efficacité pour l'azote apporté en considérant un coefficient apparent d'utilisation moyen de 30% sur un premier apport et de 60% sur un second apport (Machet et al., 1987 ; Recous et al., 1997). En tenant compte de l'amélioration de l'efficacité des apports plus tardifs, le report d'un apport d'azote de 50 kgN conduit à économiser 15 kgN/ha dans ces situations (ce qui représente une partie du premier apport, pas la totalité). Cette action conduit à supprimer un épandage d'azote sur les surfaces concernées.

Les éléments de calcul sont disponibles en Annexe 4. A partir de la réduction unitaire de la fertilisation minérale, ont été appliqués les deux calculs.

Calcul "Citepa" :

$$E(N_2O) = QN \times \text{Frac} \times FE \times FCN-N_2O \times PRG$$

avec : QN la quantité d'engrais minéral azoté non épanchée en tonnes de N, Frac la proportion d'émissions, FE le facteur d'émissions, FCN-N₂O le facteur de conversion (1,57) et PRG le Pouvoir de Réchauffement Global (310 dans CITEPA 2010)

Frac = 90% et FE = 1,25% pour N₂O direct

Frac = 20% et FE = 1,0% pour les émissions indirectes par déposition après volatilisation

Frac = 30% et FE = 2,5% pour les émissions indirectes par transport et lixiviation hors de la parcelle

Calcul "expert" :

Pour les émissions directes de N₂O, nous avons introduit les fonctions définies plus haut :

$$E(N_2O) = 158. e^{(0,012.D).k}$$

avec : E(N₂O) en kg eq CO₂

D : dose d'engrais appliquée au sol en kgN/ha

L'efficacité de l'azote étant meilleure, l'azote apporté est moins disponible pour être transformé en N₂O et pour être lessivé. Le coefficient k est fixé à 0,9 et FracLeach à 0,27. La volatilisation n'est pas affectée.

Tableau 17. Calcul de l'atténuation unitaire de la sous-action C1

(kg CO ₂ e/ha/an)	CO ₂ "Citepa" - "expert"	N ₂ O "Citepa" - "expert"	Total "Citepa" - "expert"
Emissions directes			
Moins d'apport azoté et/ou meilleure efficacité		0,082 - 0,186	
Epanchage	0,003 - 0,003		
Emissions indirectes			
Lixiviation Moins d'émissions indirectes du fait du moindre apport et/ou d'une meilleure efficacité		0,055 - 0,031	
Volatilisation Moins d'émissions indirectes du fait du moindre apport et/ou d'une meilleure efficacité		0,007 - 0,011	
Sous total			0,147 - 0,231
Emissions amont			
Synthèse et transport des fertilisants		0,087 - 0,087	
Total			0,234 - 0,318

• Conclusion : potentiel d'atténuation unitaire de la sous-action

Le potentiel unitaire d'atténuation de cette sous-action se situe entre **0,147 et 0,231 MgCO₂e/ha/an** selon le calcul utilisé pour les émissions directes et indirectes sur l'exploitation, et **0,087 MgCO₂e/ha/an** pour les émissions induites amont. Cette atténuation correspond à une diminution moyenne de 15 kgN/ha, équivalente à une baisse de 9% de la fertilisation sur les surfaces considérées par la mesure.

5.4.b. Ligne de base et conditions de développement de l'action

• Situation actuelle

Le fractionnement de l'azote de l'engrais en plusieurs apports est fréquent. En 2006, 80% des surfaces recevant l'azote minéral faisaient l'objet de fractionnement des apports. Selon les données Agreste (Agreste, 2010), le nombre moyen d'apports d'azote minéral va de 1,1 pour le pois à 2,8 pour le blé tendre - avec 71% des superficies en blé tendre qui reçoivent 3 apports ou plus. Le fractionnement en 3 passages s'est installé, avec par exemple 60% des surfaces pour le blé tendre recevant 3 apports au niveau France, le premier apport représentant, en moyenne pour la France, 53 kgN/ha soit 30% de l'apport total d'azote. La tendance est à la baisse du premier apport (-5 kgN/ha pour le blé tendre entre 2001 et

2006). Ces pratiques paraissent assez hétérogènes selon les régions et les climats, et bien sûr la date du premier apport sur céréales varie, mais dans de nombreuses situations elle se situe au mois de février.

- **Conditions nécessaires à la mise en place de l'action (critères de détermination de l'AMT)**

Les conditions de mise en place de l'action sont la réalisation d'un calcul prévisionnel de bilan d'azote combiné à la mesure ou l'estimation des reliquats d'azote à la sortie de l'hiver. A partir de ces éléments, et de la prise en compte des besoins en azote des cultures en sortie de la période hivernale, il est possible de décider de la nécessité ou non d'un apport précoce d'azote.

- **Assiette maximale technique (AMT)**

Les données obtenues dans le département de l'Aisne pour les années 2005 à 2012 indiquent que le seuil de valeur de reliquat d'azote minéral sur la couche 0-90cm > 50 kgN/ha est atteint en moyenne pour 32% des parcelles pour le blé, 9% des parcelles pour l'escourgeon et 1% des parcelles pour le colza (Annexe 4).

L'assiette maximale technique constituée du blé d'hiver, de l'orge d'hiver et du colza représente 7,8 Mha, dont 1,8 Mha sont concernés par la mesure avec les valeurs moyenne de reliquats sortie hiver provenant du département de l'Aisne. Cette assiette dépend donc du pourcentage de surfaces ayant un fort reliquat à la sortie de l'hiver, ici celui calculé pour les situations analysées dans l'Aisne par le LDAR pour les années 2005 à 2012. Ce pourcentage peut varier et évoluer au cours des années, notamment en fonction de la gestion des intercultures (voir Action 4, les cultures intermédiaires pièges à nitrates). Nous proposons donc que l'incertitude porte sur les surfaces concernées chaque année, et pas sur le potentiel d'atténuation unitaire pour cette sous-action. La fourchette de valeurs hautes et basses pour cette sous-action est constituée par la proportion de surfaces des années à fort reliquat sortie hiver (AMT= 3 Mha) et des années à faible reliquat (AMT= 0,53 Mha), à partir des statistiques provenant du département de l'Aisne.

- **Scénario de diffusion (% de l'AMT atteint en 2030 et cinétique)**

Cette sous-action peut être mise en œuvre sur 100% de l'AMT d'ici 2030. Les critères de facilitation de l'adoption pourront relever de deux facteurs : la généralisation des méthodes de fertilisation raisonnée et l'accroissement du prix des engrais minéraux (rapport entre le prix des produits agricoles et le prix des engrais) conduisant à la recherche d'une efficacité accrue de l'azote apporté. Nous avons pris des paramètres de diffusion identiques à ceux de la sous-action A1 en considérant que les déterminants étaient les mêmes.

5.4.c. Potentiel d'atténuation à l'échelle du territoire français

- **Potentiel d'atténuation de l'année 2030 en appliquant la sous-action sur l'AMT**

Avec ces hypothèses, la sous-action conduit à une économie d'engrais azoté minéral de **27 000 430 kgN/an (44 978 359 – 8 063 756)**, ce qui représente une réduction de 15,0 kgN/ha/an sur les surfaces ayant un reliquat > 50 kgN/ha (et 3,5 kgN/ha si l'on considère comme assiette 100% des surfaces de toutes les cultures considérées).

Ceci se traduit par un potentiel d'atténuation de l'année 2030 équivalent à **264 604 MgCO_{2e}/an (79 025 - 234 086) (calcul "Citepa") ou 415 807 (124 182 à 602 599-) MgCO_{2e}/an (calcul "expert"), et 144 453 (167 238 - 43 141) MgCO_{2e}/an d'émissions induites amont.**

- **Potentiel d'atténuation cumulé sur la période 2010-2030 en appliquant le scénario de diffusion**

En appliquant le scénario de diffusion proposé ci-dessus, l'atténuation cumulée sur la période 2010-2030 pour cette sous-action est de **3 852 034 (6 416 867- 1 150 421) MgCO_{2e} (calcul "Citepa") à 6 053 197 (10 083 649 - 1 807 805) MgCO_{2e} (calcul "expert") d'émissions directes et indirectes, et 2 279 775 (3 797 737 - 680 861) MgCO_{2e} d'émissions induites amont.**

5.4.d. Coûts et bénéfices induits par la sous-action

- **Inventaire des modifications induites par la sous-action**

Les modifications sont une baisse de la quantité d'azote minéral apporté par les engrais et la suppression d'un épandage sur les surfaces concernées : on fait l'hypothèse qu'il n'y a pas décalage de l'apport à une date ultérieure, mais augmentation de la dose à l'apport suivant. Il y a un accompagnement technique accru dans le cadre du conseil de fertilisation. Il n'y a pas de diminution des rendements.

- Estimations des coûts/bénéfices

La sous-action C1 engendre une diminution de la dose d'azote minéral moyenne de 15 kgN/ha et un passage en moins par hectare, soit des gains respectifs de 13,66 €/ha et 9,07 €/ha. Nous faisons l'hypothèse que le coût supplémentaire d'estimation des reliquats sortie hiver est nul si les agriculteurs utilisent les données publiées et ne font pas de mesures eux-mêmes (cependant il faut qu'un certain nombre d'agriculteurs continuent à les faire pour générer les données publiées). La sous-action engendre donc un gain net de 22,74 €/ha.

- Conclusions : coût unitaire de la sous-action, coût annuel pour l'AMT en 2030 et coût cumulé sur la période 2010-2030

Tableau 18.

Coût unitaire (€/ha/an)	AMT 2030 (ha)	Coût AMT 2030 (€/an)	Coût cumulé 2010-2030 (€)
-22.74	1 800 029 (537 584 à 2 998 557)	-40 929 652 (-12 223 758 à -68 182 194)	- 595 842 468

5.4.e. Synthèse et discussion: récapitulatif de l'atténuation escomptée, du coût, et du coût de la tonne de CO₂e évité

L'atténuation unitaire moyenne a été estimée à 0,147 MgCO₂e/ha/an (0,231 MgCO₂ avec le calcul "expert") pour les émissions directes et indirectes liées à l'exploitation agricole, et 0,087 MgCO₂e/ha/an d'émissions amont induites.

En appliquant cette atténuation sur l'assiette maximale technique, l'atténuation annuelle moyenne est de 264 604 MgCO₂e/an (calcul "Citepa") à 415 807 MgCO₂e/an (calcul "expert"), et 144 453 MgCO₂e/an d'émissions induites amont.

L'atténuation cumulée moyenne sur la période 2010-203 est de 3 852 034 MgCO₂e (calcul "Citepa") à 6 053 197 MgCO₂e (calcul "expert"), et 410 073 MgCO₂e d'émissions induites amont.

Le coût unitaire est de -22,74 €/ha/an, et le coût d'atténuation est de -154,2 €/MgCO₂e (calcul "Citepa") et -98,3 €/MgCO₂e (calculé "expert"), hors émissions induites amont.

Ces estimations sont susceptibles de varier, en fonction des années (effet du climat sur le reliquat d'azote en sortie d'hiver, et effet des pratiques de l'année n-1 : importance du reliquat à la récolte de la culture précédente, gestion de l'interculture). Cependant, comme les données de l'enquête "Pratiques culturales" le suggèrent, la tendance est à la réduction de l'azote au premier apport, et dans certains cas la recommandation est faite de supprimer le premier apport. On peut donc affirmer qu'il existe un réel potentiel d'atténuation basé sur une estimation des reliquats d'azote dans les sols, et la prise de décision du report de date du premier apport sur les céréales d'hiver et le colza.

5.5. Potentiel d'atténuation et du coût de la sous-action C2

5.5.a. Potentiel d'atténuation unitaire

- Inventaire des effets sur les émissions

La sous-action "**Adapter les formes d'azote minéral apportées**" a des conséquences sur les émissions directes sur l'exploitation agricole et sur les émissions indirectes et induites en amont de l'exploitation agricole (Tableau 19).

Tableau 19. Inventaire qualitatif des émissions directes, indirectes et induites par la sous-action C2

Emissions directes	- émissions de N ₂ O liées aux quantités de fertilisant azotés économisées - émissions liées à l'usage des engins agricoles (épandage)
Emissions indirectes	- réduction de la lixiviation des nitrates à partir des sols - réduction de la volatilisation et dépôt d'ammoniac
Emissions induites	- émissions liées à la fabrication et au transport de fertilisants azotés minéraux

- Quantification de l'atténuation

L'atténuation permise par les inhibiteurs de nitrification concerne deux effets : la réduction de l'émission de N₂O par kg N apporté, et la réduction des pertes (indirectes) d'azote conduisant à un recouvrement plus important de l'azote par la culture. Il s'ensuit une diminution des pertes indirectes et la possibilité de réduire les doses d'azote apportées. La diminution des

émissions directes de N₂O par l'utilisation d'inhibiteur de nitrification n'est pas prise en compte dans les calculs d'inventaire CITEPA, et donc il n'y a pas de diminution des émissions liée directement à l'utilisation de l'inhibiteur ni plus généralement aux changements de formes d'azote. Cet aspect est par contre pris en compte dans le calcul "expert".

Sur la base de données disponibles (Akiyama et al., 2010 ; Watson et al., 2009), nous retenons l'hypothèse d'une réduction moyenne possible de 10% de la quantité d'azote des engrais sur l'ensemble des surfaces concernées par l'apport de l'inhibiteur, bien qu'un tel résultat n'ait pas été obtenu sur des données récentes sur blé d'hiver et blé dur, en conditions françaises (Cohan, 2013). La réduction est calculée en tenant compte des dynamiques des besoins en azote des cultures, et l'apport d'inhibiteur ne concerne donc qu'une partie des apports d'azote, en se basant sur les recommandations agronomiques fournies pour l'usage du produit ENTEC@26. La molécule DMPP est utilisée comme "modèle" de molécule.

Les éléments de calcul détaillés sont disponibles en Annexe 5. A partir de la réduction unitaire de la fertilisation minérale, ont été appliqués les deux modes de calcul.

Calcul "Citepa" :

$$E(N_2O) = QN \times \text{Frac} \times FE \times FCN-N_2O \times PRG$$

avec : QN la quantité d'engrais minéral azoté non épanchée en tonnes de N, Frac la proportion d'émissions, FE le facteur d'émissions, FCN-N₂O le facteur de conversion (1,57) et PRG le Pouvoir de Réchauffement Global (310 dans CITEPA 2010).

Frac = 90% et FE = 1,25% pour N₂O direct

Frac = 20% et FE = 1,0% pour les émissions indirectes par déposition après volatilisation

Frac = 30% et FE = 2,5% pour les émissions indirectes par transport et lixiviation hors de la parcelle

Calcul "expert" :

Pour les émissions directes de N₂O, nous avons introduit les fonctions définies ci-dessus

$$E(N_2O) = 158. e^{(0,012.D).k}$$

avec : E(N₂O) en kg eq CO₂

D : dose d'engrais appliquée au sol en kgN/ha

La quantité d'engrais apportée est modifiée, nous passons d'une dose QN à une dose Q'N.

L'efficacité de l'azote est améliorée pour les engrais concernés par l'inhibiteur (3/4 des apports). Ainsi k est fixé à 0,8 et FracLeach à 0,27 pour 3/4 des engrais. La volatilisation n'est pas affectée par la mesure.

Tableau 20. Calcul de l'atténuation unitaire de la sous-action C2

(kgCO ₂ e/ha/an)	CO ₂ "Citepa" - "expert"	N ₂ O "Citepa" - "expert"	Total "Citepa" - "expert"
Emissions directes			
Moins d'apport azoté et/ou meilleure efficacité		0,056 – 0,233	
Moins de fuel, réduction des épandages N	0,003 - 0,003		
Emissions indirectes			
Lixiviation Moins d'émissions indirectes du fait du moindre apport et/ou d'une meilleure efficacité		0,037 – 0,021	
Volatilisation Moins d'émissions indirectes du fait du moindre apport et/ou d'une meilleure efficacité		0,005 – 0,005	
Sous total			0,101-0,262
Emissions amont Synthèse et transport des fertilisants		0,055–0,055	
Total			0,156-0,317

• Conclusion : potentiel d'atténuation unitaire de la sous-action

Le potentiel unitaire d'atténuation de cette sous-action se situe entre **0,101 et 0,262 MgCO₂e/ha/an** selon le calcul utilisé pour les émissions directes et indirectes sur l'exploitation, et **0,055 MgCO₂e/ha/an** pour les émissions induites amont. Le potentiel d'atténuation permis par la modification des formes d'azote n'est pas pris en compte dans les calculs CITEPA 2010. Il s'ensuit une différence importante dans l'estimation du potentiel d'atténuation entre les deux calculs.

5.5.b. Ligne de base et conditions de développement de l'action

• Situation actuelle

En 2010 (UNIFA, 2011), les engrais simples représentaient 90% de l'azote des engrais utilisés, dont 40,5% d'ammonitrates (50% ammonium, 50% nitrate), 29,7% de solutions azotées (50% urée, 25% ammonium, 25% nitrate), 16,9% d'urée, le reste étant d'autres formes simples de N et des engrais composés (NP, NK, NPK). On ne trouve pas d'évolution nette entre les années, et la répartition est fortement dépendante du contexte des prix. Si l'on prend des chiffres moyens sur plusieurs années, on peut calculer qu'environ 30 à 35% de l'azote apporté l'est sous forme de nitrate, le reste étant apporté sous forme d'urée ou d'ammonium. Environ 2/3 de l'azote apporté passent donc potentiellement par la nitrification avant d'être disponibles sous forme de nitrate. Ces données moyennes à l'échelle nationale recouvrent des disparités entre régions. En ce qui concerne l'utilisation d'engrais à libération lente, il n'y a pas de statistiques disponibles sur l'utilisation de tels produits à l'échelle France. La principale utilisation actuelle est donc pour les cultures spéciales où la fertilisation est un poste mineur des charges totales de l'exploitation, et donc le supplément financier lié à l'engrais retard représente peu par rapport au coût total (M. Hervé, communication personnelle). Cependant, les limitations techniques sont mineures et l'inhibiteur pourrait être associé potentiellement à 60 à 70% des quantités d'azote apporté par les fertilisants (voir Annexe 5). Les limites actuelles à l'utilisation en grandes cultures sont le surcoût lié à la formulation des produits et, dans une moindre mesure, le manque d'information technique.

Actuellement, la progression de l'usage d'un engrais type ENTEC®, en absence d'incitation et avec un surcoût élevé, est de 50% par an. Cet engrais représente actuellement environ 1,6% de la fertilisation minérale totale (Hervé M., communication personnelle). L'intérêt principal est la suppression d'un premier apport d'azote sur céréales, en termes de simplification du travail. D'un point de vue réglementaire, ce produit est dans la catégorie "inhibiteurs de nitrification". Il est actuellement commercialisé par le protocole de "reconnaissance mutuelle" en s'appuyant sur l'homologation autrichienne.

• Conditions nécessaires à la mise en place de l'action (critères de détermination de l'AMT)

L'assiette maximale technique est calculée à partir des quantités d'engrais susceptibles d'être combinés à l'inhibiteur. On considère du point de vue agronomique qu'une fraction de la dose totale d'engrais ne doit pas contenir l'inhibiteur (nécessité de mise à disposition rapide de N) : selon les cultures, les doses d'azote associées à l'inhibiteur ont été calculées comme la dose totale d'azote -40 à -70 kgN/ha (voir Annexe 5).

• Assiette maximale technique (AMT)

La sous-action C2 a été appliquée aux cultures suivantes : blé tendre, blé dur, orge, colza, maïs grain, maïs fourrage, pomme de terre et betterave. Nous avons considéré qu'il était nécessaire de tenir compte de problèmes potentiels d'innocuité (écotoxicité pour les sols) et avons limité l'usage à 20% de l'assiette maximale technique, ce qui peut signifier de l'apporter une année sur cinq sur le même sol, ou de réduire son utilisation à un cinquième de la dose maximale. Ceci revient à considérer que l'AMT est fixée à 20% du potentiel agronomique de substitution (ou de l'assiette théorique AT).

L'assiette technique choisie représente alors **2,3 Mha et 320 000 kgN/an associés à l'inhibiteur**. La réduction de la fertilisation minérale permise par l'utilisation de l'inhibiteur, soit 10% des apports d'azote, représente 23 600 kgN/an et 10,2 kgN/ha sur les surfaces concernées. Cette valeur moyenne est encadrée par deux valeurs reflétant les incertitudes associées à l'adoption des inhibiteurs de nitrification, la valeur basse obtenue avec 10% du potentiel agronomique d'utilisation de l'inhibiteur et la valeur haute obtenue avec 25% du potentiel agronomique de d'utilisation de l'inhibiteur (assiette théorique).

• Scénario de diffusion (% de l'AMT atteint en 2030 et cinétique)

Cette sous-action peut être mise en œuvre sur 100% de l'AMT d'ici 2030. Les critères de facilitation de l'adoption pourront relever de deux facteurs : (i) l'augmentation du prix des engrais, réduisant les écarts entre formulations classiques des engrais azotés simples (urée, solution azotée, ammonitrate) et formulations avec inhibiteur de nitrification, (ii) une incitation financière forte pour réduire les émissions de GES issues de la fertilisation, associée à une évolution des méthodes d'inventaire nationaux, prenant en compte l'effet très positif des inhibiteurs de nitrification sur les émissions directes de N₂O et sur les émissions *via* la réduction des doses de fertilisants.

5.5.c. Potentiel d'atténuation à l'échelle du territoire français

• Potentiel d'atténuation de l'année 2030 en appliquant la sous-action sur l'AMT

Avec ces hypothèses, la sous-action conduit à une économie d'engrais azoté minéral de 23 627 353 kgN/an. Elle conduit aussi à une baisse importante des émissions directes de N₂O et à une diminution des émissions indirectes liées aux pertes

d'azote hors de la parcelle agricole (volatilisation et lixiviation). L'ensemble de ces effets se traduit par un potentiel d'atténuation de l'année 2030 équivalent à **234 086** (117 043 - 292 608) **MgCO_{2e}/an (calcul "Citepa")** ou **607 234** (303 617 - 759 042) **MgCO_{2e}/an (calcul "expert")**, et **125 343** (158 530 - 63 412) **MgCO_{2e} /an d'émissions induites amont**.

- **Potentiel d'atténuation cumulé sur la période 2010-2030 en appliquant le scénario de diffusion**

En appliquant le scénario de diffusion proposé ci-dessus, l'atténuation cumulée sur la période 2010-2030 pour cette sous-action est de **3 320 200** (4 253 231 - 1 701 295) **MgCO_{2e}** (calcul "Citepa") à **8 612 796** (10 948 911 - 4 379 572) **MgCO_{2e}** (calcul "expert") d'émissions directes et indirectes, et **1 808 030** (2 316 116 - 926 448) **MgCO_{2e}** d'émissions induites amont.

5.5.d. Coûts et bénéfices induits par la sous-action

- **Inventaire des modifications induites par la sous-action**

Les modifications induites sont la diminution de la quantité totale d'engrais azoté apporté, le changement de la forme d'engrais, la suppression d'un épandage sur les surfaces concernées. Il n'y a pas de diminution des rendements. Il y a un accompagnement technique accru dans le cadre du conseil de fertilisation avec l'usage des inhibiteurs de nitrification.

- **Estimations des coûts/bénéfices**

Les diminutions de 10,2 kgN/ha de la dose moyenne d'azote minéral apporté et de 0,95 passage/ha engendrent respectivement un gain de 9,28 €/ha et de 6,09 €/ha. Le surcoût de l'inhibiteur est de 0,34 €/kgN, soit en moyenne 31,19 €/ha. La sous-action C2 a un coût net de 15,81 €/ha.

- **Conclusions : coût unitaire de la sous-action, coût annuel pour l'AMT (ou le % atteint) en 2030 et coût cumulé sur la période 2010-2030**

Tableau 21.

Coût unitaire (€/ha/an)	AMT 2030 (ha)	Coût AMT 2030 (€/an)	Coût cumulé 2010-2030 (€)
15,81	2 317 687 (1 158 843 - 2 897 108)	36 656 975 (18 328 488 – 45 821 219)	519 929 834

5.5.e. Synthèse et discussion: récapitulatif de l'atténuation escomptée, du coût, et du coût de la tonne de CO_{2e} évité

L'atténuation unitaire moyenne a été estimée à 0,101 MgCO_{2e}/ha/an (0,262 MgCO₂ avec le calcul "expert") pour les émissions directes et indirectes liées à l'exploitation agricole, et 0,055 MgCO_{2e}/ha/an d'émissions amont induites.

En appliquant cette atténuation sur l'assiette maximale technique, l'atténuation annuelle moyenne est de 234 086 MgCO_{2e}/an (calcul "Citepa") à 607 234 MgCO_{2e}/an (calcul "expert"), et 125 343 MgCO_{2e}/an d'émissions induites amont.

L'atténuation moyenne cumulée sur la période 2010-203 est de 3 320 200 MgCO_{2e} (calcul "Citepa") à 8 612 796 MgCO_{2e} (calcul "expert"), et 1 808 030 MgCO_{2e} d'émissions induites amont.

Le coût unitaire est de 15,81 €/ha /an, et le coût d'atténuation est de 156,52 €/MgCO_{2e} (calcul "Citepa") et 60,40 €/MgCO_{2e} (calculé "expert"), hors coût de transaction et émissions induites amont.

Le potentiel d'atténuation de cette sous-action est fortement lié à l'évolution du prix des engrais. Plus le prix des engrais augmentera, et moins le surcoût lié à l'addition d'un inhibiteur de nitrification sera important, relativement. On peut donc anticiper un intérêt accru pour cette solution technique avec l'augmentation du prix des engrais minéraux. L'incertitude de l'assiette repose sur le caractère éventuellement toxique de cette molécule apportée aux sols de manière fréquente. Nous avons tenu compte de cette éventualité en réduisant de 80% l'assiette technique maximale. L'atténuation totale et cumulée de cette sous-action dépend donc aussi de ce facteur. Au maximum technique, cette atténuation totale pourrait donc être multipliée par 5, s'il était démontré qu'aucun problème d'écotoxicité n'est associé à l'usage fréquent de cette molécule.

Nous pouvons comparer ce potentiel d'atténuation à celui que permettrait un changement d'utilisation des formes d'azote, c'est-à-dire la substitution des engrais apportés sous forme d'urée et de solution azotée, par l'ammonium nitrate, forme pour laquelle la volatilisation est quasi-inexistante. A partir des données techniques existantes (ex : Sylvester-Bradley et al. 2012 ; Cohan et Le Souder, 2013), nous avons utilisé une majoration forfaitaire de 15% de la dose totale d'azote apporté pour

compenser le risque de volatilisation, ce qui ne tient pas compte bien sûr des particularités locales, et des différences de risque entre urée et solution azotée (voir Annexe 5). La réduction permise par le passage à l'ammonitrate est alors de 10,3 kgN/ha/an sur 11,6 Mha. L'atténuation unitaire est alors estimée à 0,099 MgCO₂e/ha/an (calcul "Citepa") pour les émissions directes et indirectes liées à l'exploitation agricole, et 0,054 MgCO₂e/ha/an d'émissions amont induites. Les diminutions de 10,2 kgN/ha de la dose moyenne d'azote minéral apporté génère un gain net de 0,96 €/ha. Le coût net d'atténuation est alors de -9,75 €/MgCO₂e, hors coût de transaction et émissions induites amont.

5.6. Potentiel d'atténuation et du coût de la sous-action C3

5.6.a. Potentiel d'atténuation unitaire

- Inventaire des effets sur les émissions

La sous-action "Enfouir de manière localisée l'azote minéral dans les sols" a des conséquences sur les émissions directes sur l'exploitation agricole et sur les émissions indirectes et induites en amont de l'exploitation agricole (Tableau 22).

Tableau 22. Inventaire qualitatif des émissions directes, indirectes et induites par la sous-action C3

Emissions directes	- émissions de N ₂ O liées aux quantités de fertilisant azotés économisées - émissions liées à l'usage des engins agricoles (enfouissement de l'azote)
Emissions indirectes	- diminution de la lixiviation du nitrate à partir des sols par meilleure efficacité de N - diminution de la volatilisation et dépôt d'ammoniac
Emissions induites	- émissions liées à la fabrication et au transport de fertilisants azotés minéraux

- Quantification de l'atténuation

L'atténuation permise par cette sous-action C3 concerne deux effets : la réduction de la volatilisation de l'azote grâce à l'enfouissement dans les sols et la réduction de la quantité d'azote minéral apporté, permise par une efficacité accrue de l'azote apporté. Il n'y a pas d'effet sur l'émission de N₂O par kg de N apporté. La sous-action s'applique aux grandes cultures semées au printemps : blé de printemps, orge de printemps, pomme de terre, betterave, maïs et pour lesquelles l'enfouissement de l'engrais est possible.

Les éléments de calcul sont disponibles en Annexe 6. Une réduction de la fertilisation minérale représentant 10% de la fertilisation minérale totale a été considérée, la fourchette basse étant obtenue en considérant qu'il n'y a pas de réduction de la fertilisation (0%) et la valeur haute par une réduction de 15% de la dose totale.

Calcul "Citepa" :

$$E(N_2O) = QN \times \text{Frac} \times FE \times FCN-N_2O \times PRG$$

avec : QN la quantité d'engrais minéral azoté non épanché en tonnes de N, Frac la proportion d'émissions, FE le facteur d'émissions, FCN-N₂O le facteur de conversion (1,57) et PRG le Pouvoir de Réchauffement Global (310 dans CITEPA 2010).

Frac = 90% et FE = 1,25% pour N₂O direct

Frac = 20% et FE = 1,0% pour les émissions indirectes par déposition après volatilisation

Frac = 30% et FE = 2,5% pour les émissions indirectes par transport et lixiviation hors de la parcelle

Calcul "expert" :

Pour les émissions directes de N₂O, nous avons introduit les fonctions définies plus haut :

$$E(N_2O) = 158. e^{(0,012.D).k}$$

avec : E(N₂O) en kg eq CO₂

D : dose d'engrais appliquée au sol en kgN/ha

La quantité d'engrais apportée est modifiée, nous passons d'une dose QN à une dose Q'N.

La volatilisation est diminuée, ce qui modifie en conséquence l'efficacité de l'azote. Fracvolat est fixé à 0,067 et k à 0,96.

Les paramètres de la lixiviation ne sont pas modifiés.

Tableau 23. Calcul de l'atténuation unitaire de la sous-action C3

(kgCO ₂ e/ha/an)	CO ₂ "Citepa" - "expert"	N ₂ O "Citepa" - "expert"	Total "Citepa" - "expert"
Emissions directes			
Moins d'apport azoté et/ou meilleure efficacité		0,067 – 0,119 (0 -0,028) - (0,101-0,159)	
Emissions indirectes			
Lixiviation Moins d'émissions indirectes du fait du moindre apport et/ou d'une meilleure efficacité		0,013 – 0,023 (0-0,019) - (0,019-0,025)	
Volatilisation Moins d'émissions indirectes du fait du moindre apport et/ou d'une meilleure efficacité		0,006 – 0,013 (0-0) - (0,009-0,019)	
Sous total			0,086-0,154 (0-0,047) - (0,129-0,204)
Emissions amont			
Synthèse et transport des fertilisants		0,065 – 0,065 (0-0) - (0,098-0,098)	
Total			0,151-0,220 (0-0,047) - (0,227-0,301)

- **Conclusion : potentiel d'atténuation unitaire de la sous-action**

Le potentiel unitaire d'atténuation de cette sous-action se situe entre **0,086 (0 - 0,129)** (calcul "Citepa") et **0,154 (0,047 - 0,204) MgCO₂e/ha/an** (calcul "expert") selon le calcul utilisé pour les émissions directes et indirectes sur l'exploitation, et **0,065 (0-0,098) MgCO₂e/ha/an** pour les émissions induites amont. Les calculs CITEPA 2010 ne prenant pas en compte les techniques telles que la localisation de l'azote qui réduit la volatilisation et améliore l'efficacité, le calcul "Citepa" minimise les effets. Cette sous-action permet une diminution moyenne de **12,3 (0-18,4) kgN/ha** pour une hypothèse de diminution de 10% (0-15%) de la fertilisation sur les surfaces considérées par la mesure.

5.6.b. Ligne de base et conditions de développement de l'action

- **Situation actuelle**

Actuellement, les pratiques de localisation de l'engrais azoté sont recommandées pour des cultures de printemps au semis de ces cultures (en particulier betterave sucrière, maïs, orge de printemps...). Les essais agronomiques menés par les instituts techniques notamment montrent un gain d'efficacité de l'azote et un gain de rendement dans certains cas à la dose optimale, et une réduction possible de l'apport d'azote pour obtenir un rendement équivalent ; on trouve la mention de cette technique dans de nombreux documents techniques et dans la presse agricole (ITB 2008 ; ITB 2009 ; Cohan et al. 2012). Il existe cependant une certaine variabilité liée aux conditions d'efficacité sur le terrain, notamment pour l'orge de printemps. Le taux actuel d'adoption de cette pratique serait d'environ 10% pour la betterave sucrière (source ITB) et serait plus faible pour les céréales, ce taux d'adoption étant relativement stable. Cette mesure est aussi prônée dans les systèmes de culture en agriculture de conservation (semis direct et présence de résidus végétaux à la surface), où l'apport d'azote à la surface du sol, en contact avec une couche de résidus, n'est pas souhaitable. Cette possibilité d'enfouissement est plutôt associée au type de semis et de semoirs.

- **Conditions nécessaires à la mise en place de l'action (critères de détermination de l'AMT)**

La mise en place de l'action est possible sur les cultures de printemps et notamment celles qui ont des besoins importants en début de cycle : blé de printemps, orge de printemps, pomme de terre, betterave, maïs. Cette option technique est applicable aux engrais minéraux apportés sous forme solide, sur le rang ou dans les inter-rangs au moment du semis des cultures. Il s'agit donc de situations où l'intérêt d'apporter de l'engrais au semis est avéré.

- **Assiette maximale technique (AMT)**

Les surfaces potentiellement concernées par un premier apport sur cultures de printemps sont celles en : blé tendre et blé dur de printemps, orge de printemps, maïs grain et maïs fourrage, pomme de terre, betterave. L'assiette maximale technique représente **3,7 Mha**.

- Scénario de diffusion (% de l'AMT atteint en 2030 et cinétique)

Cette sous-action peut être mise en œuvre sur 100% de l'AMT d'ici 2030. Les critères de facilitation de l'adoption dépendront de deux facteurs : l'accroissement du prix des engrais minéraux (augmentation du prix de l'énergie ou instauration de taxes) conduisant à la recherche d'une efficacité accrue de l'azote apporté, l'accompagnement technique et l'adaptation des techniques d'apport des engrais azotés (modification des équipements et/ou appel à des entreprises extérieures). Les agriculteurs ayant opté pour des semis dans des situations sans travail du sol ou avec travail du sol superficiel sont équipés *a priori*. Mais la proportion d'agriculteurs concernés reste faible (voir Action 3, les techniques culturales sans labour). Le scénario de diffusion choisi est un scénario plutôt lent avec l'atteinte de la moitié de l'assiette maximale technique en 2020.

5.6.c. Potentiel d'atténuation à l'échelle du territoire français

- Potentiel d'atténuation de l'année 2030 en appliquant la sous-action sur l'AMT

Avec ces hypothèses, la sous-action conduit à une économie d'engrais azoté minéral de 46 314 701 kgN/an. Ceci se traduit par une baisse des émissions directes de N₂O et émissions indirectes par volatilisation et par lixiviation grâce à la meilleure efficacité de l'azote. L'ensemble de ces effets se traduit par un potentiel d'atténuation en 2030 équivalent à 323 957 (0 – 485 935) MgCO₂e/an (calcul "Citepa") à **580 109** (177 046 - 768 456) MgCO₂e/an (calcul "expert"), et **245 699** (0-368 549) MgCO₂e/an d'émissions induites amont.

- Potentiel d'atténuation cumulé sur la période 2010-2030 en appliquant le scénario de diffusion

En appliquant le scénario de diffusion proposé ci-dessus, l'atténuation cumulée sur la période 2010-2030 pour cette sous-action est de **3 750 385** (0- 5 625 577) MgCO₂e/an (calcul "Citepa") à **6 715 805** (2 049 629 - 8 896 262) MgCO₂e/an (calcul "expert"), et **2 834 593** (0- 4 273 694) MgCO₂e/an d'émissions induites amont.

5.6.d. Coûts et bénéfices induits par la sous-action

- Inventaire des modifications induites par la sous-action

Les modifications induites par la sous-action sont :

- la baisse de la quantité d'azote minéral apporté par les engrais ;
- la modification des modalités d'apport d'azote au semis induisant dans certains cas l'utilisation d'un équipement d'enfouissement généralement associé à un semoir ;

Il n'y a pas de baisse de rendements, et éventuellement une augmentation si la dose d'azote n'est pas modifiée. Dans le cadre de cette étude, nous privilégions la baisse de la dose totale, à rendement équivalent.

- Estimations des coûts/bénéfices

Le surcoût d'un équipement fertiliseur pour semoir est de 2,1 €/ha. La diminution moyenne de la dose d'azote minéral est de 12,3 kgN/ha, soit un gain de 11,2 €. La sous-action C3 génère un gain net de 9,1 €/ha.

- Conclusions : coût unitaire de la sous-action, coût annuel pour l'AMT en 2030 et coût cumulé sur la période 2010-2030

Tableau 24.

Coût unitaire (€/ha/an)	AMT 2030 (ha)	Coût AMT 2030 (€/an)	Coût cumulé 2010-2030 (€)
-9,1 (2,1 à -14,7)	3 767 001	-34 281 991 (7 910 702 à -55 378 337)	-396 869 481 (91 579 163 à -641 093 803)

5.7.e. Synthèse: récapitulatif de l'atténuation escomptée, du coût, et du coût de la tonne de CO₂e évité

L'atténuation unitaire a été estimée à 0,086 MgCO₂e/ha/an et 0,154 MgCO₂ avec le calcul "expert", pour les émissions directes et indirectes liées à l'exploitation agricole, et 0,065 MgCO₂e/ha/an d'émissions amont induites.

En appliquant cette atténuation sur l'assiette maximale technique, l'atténuation annuelle est de 323 957 MgCO_{2e}/an (calcul "Citepa") à 580 109 Mg CO_{2e}/an (calcul "expert"), et 245 699 MgCO_{2e}/an d'émissions induites amont.

L'atténuation cumulée sur la période 2010-203 est de 3 750 385 MgCO_{2e} (calcul "Citepa") à 6 715 805 MgCO_{2e} (calcul "expert"), et 2 834 593 MgCO_{2e} d'émissions induites amont.

Le coût unitaire est de -9,1 €/ha/an, et le coût d'atténuation est de -105,6 €/MgCO_{2e} (calcul "Citepa") et -58,9 €/MgCO_{2e} (calculé "expert"), hors coût de transaction et émissions induites amont.

6. Synthèse : potentiel d'atténuation et coût annuels et cumulés pour l'ensemble de l'action

Dans le Tableau 25 sont récapitulés les potentiels d'atténuation et les coûts pour chacune des sous-actions de l'action "Fertilisation azotée".

Tableau 25. Synthèse des potentiels d'atténuation et des coûts unitaires et cumulés pour les différentes sous-actions de l'action "Fertilisation azotée"

	Potentiel d'atténuation (MgCO _{2e} /ha)			Coût unitaire (€/ha)	Coût AMT2030 (€)	Coût d'atténuation (€/MgCO _{2e})		Coûts cumulés 2010-2030 (€)
	"Citepa"	"expert"	induit			"Citepa"	"expert"	
Sous-action A1 Méthode bilan	0,190 0,142-0,282	0,222 0,170-0,315	0,109 0,078-0,156	-8,7	-101 362 453	-45,7	-39,1	-1 475 606 339
Sous-action A2 Réduction intrants	0,100 0,079-0,121	0,120 0,095-0,145	0,060 0,047-0,073	12,6	152 219 191	125,8	104,4	2 002 390 169
Sous-action B Substitution N org	0,138 0,094-0,214	0,156 0,107-0,236	0,076 0,052-0,118	-11,6	-139 963 660	-83,8	-74,3	-1 869 379 862
Sous-action C1* Date d'apport	0,147	0,231	0,087	-22,7	-40 929 652	-154,2	-98,3	-595 842 468
Sous-action C2* Inhibiteur nit	0,101	0,262	0,055	15,8	36 656 975	156,5	60,4	519 929 834
Sous-action C3 Apport localisé	0,086 0-0,047	0,154 0,129-0,204	0,065 0-0,098	-9,1	-34 281 991	-105,6	-58,9	-396 869 481

* la fourchette associée aux incertitudes porte sur l'assiette (hectares concernés) et non sur l'atténuation unitaire

Tableau 26. Synthèse des atténuations obtenues en 2030 par les calculs "Citepa" et "expert"

	Atténuation 2030 direct + indirect (MgCO _{2e})	
	"Citepa"	"expert"
Sous-action A1	2 225 153	2 599 916
Sous-action A2	1 209 749	1 451 699
Sous-action B	1 666 345	1 883 695
Sous-action C1	264 604	415 807
Sous-action C2	234 086	607 234
Sous-action C3	323 957	580 109

Le calcul "expert" combine : (1) l'introduction d'une relation de type exponentiel entre les apports d'azote et les émissions de N₂O, (2) la prise en compte des effets des pratiques testées sur les différentes formes de perte d'azote (émissions directes de N₂O, volatilisation et lixiviation de nitrate) et (3) la mise à jour des coefficients GIEC aux valeurs de 2006 pour la volatilisation et la lixiviation. Ces différentes modifications dans la formule de calcul conduisent à une augmentation des estimations des potentiels d'atténuation, légèrement pour les sous-actions A1, A2 et B pour lesquelles seul l'effet de la dose apportée sur les émissions est modifiée par le calcul, et de manière plus marquée pour les sous-actions C1, C2 et C3 qui modifient l'efficacité de l'azote, car ce paramètre n'est pas du tout pris en compte dans le calcul initial.

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

- avec le calcul "Citepa", 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, puis en réalisant des enfouissements localisés des apports d'azote dans les sols. 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 une réduction des quantités d'azote /hectare relativement équivalente (15 à 20 kgN/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 A1, A2 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.

Pour toutes ces 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.

Enfin, nous avons réalisé deux estimations complémentaires, l'une sur la mise en œuvre systématique d'un outil de pilotage de la fertilisation azotée (exemple pris avec Epiclès®), incluant un ensemble de préconisations et des conseils à la parcelle pour l'agriculteur, l'autre sur l'utilisation systématique de l'ammonitrate comme engrais de synthèse, pour limiter les pertes par volatilisation. Nous avons vu que ces deux options permettaient des atténuations substantielles avec des réductions de -12 kgN/ha et -10,3 kgN/ha sur les assiettes de surface considérées, mais avec un coût supplémentaire associé à cette dernière option en raison du différentiel de prix des formes d'azote.

7. Discussion

7.a. Sensibilité des résultats

Parmi les nombreux angles d'analyse de la sensibilité des résultats, nous avons fait le choix de retenir particulièrement ceux concernant les données sur les pratiques de fertilisation et les valeurs du coefficient d'équivalence de l'engrais. Nous avons observé une sensibilité des résultats à ces deux angles d'analyse.

Les résultats obtenus sont effectivement dépendant des données sur les pratiques de fertilisation (doses totales, mesures de reliquats, pilotage de la fertilisation azotée). Nous pensons que les pratiques culturales ont évolué progressivement entre 2006 et 2010 comme cela avait été observé entre les enquêtes "Pratiques culturales" de 2001 et 2006, notamment avec une diffusion progressive des principes de la fertilisation raisonnée. Nous pensons que ces résultats ne bouleverseront pas l'ordre de grandeur des atténuations ni la hiérarchie entre sous-actions, et que ces évolutions affecteront principalement l'assiette sur laquelle sont mises en œuvre les sous-actions, avec une proportion plus importante des exploitations agricoles (et donc des surfaces) mettant en œuvre un ou des outils associés à l'équilibre de la fumure minérale.

L'atténuation unitaire ($\text{MgCO}_2\text{e/ha}$) est principalement affectée par les hypothèses sur les effets des pratiques sur la réduction des quantités d'azote minéral, soit à travers l'estimation de la réduction permise par l'action en terme de dose totale, soit *via* un coefficient de volatilisation (gestion des produits organiques, enfouissement localisé de l'azote, retardement de la nitrification par un inhibiteur), soit *via* un coefficient d'équivalence de l'engrais (Keq) pour la sous-action "substitution" (B), et dans certains cas la combinaison de ces différents hypothèses de calcul. Nous avons vu par exemple qu'une augmentation de 10% de la valeur du coefficient d'équivalence engrais utilisé pour convertir les quantités d'azote apportées par les produits organiques en quantité d'azote utilisée par une culture (Keq) conduit à augmenter l'atténuation unitaire de 13% environ, sans changer aucune autre hypothèse de ces calculs. Les références techniques sur les valeurs de Keq (par exemple celles mises à disposition par le COMIFER) tendent à être données pour chaque situation : type de produit x date d'apport x type de culture réceptrice, car le Keq reflète l'utilisation de l'azote apporté par la culture, elle-même dépendant du produit, des conditions d'application et des besoins de la culture. Les valeurs de Keq proposées tendent généralement à refléter aussi les précautions prises dans la gestion de l'azote, pour ne pas pénaliser les cultures par une variabilité trop grande (liée au climat et à la nature des produits apportés) du recouvrement de l'azote par les cultures.

Par ailleurs, en ce qui concerne la sous-action "substitution", nous avons choisi de n'estimer le potentiel d'atténuation et l'atténuation qu'à l'échelle globale de la France, car l'estimation par région administrative ou petite région, du potentiel de substitution entre les engrais azotés de synthèse et les produits résiduels organiques doit nécessairement faire l'objet d'études spécifiques (comme par exemple l'étude Effluents d'élevage) étant donné la diversité et la complexité des situations rencontrées. Nous estimons que le potentiel global d'amélioration de la substitution est correct à l'échelle France, mais que le coût unitaire de l'atténuation est probablement sous-estimé, notamment en raison des modifications possibles dans le stockage et l'augmentation du transport des effluents à l'échelle intra-régionale dans certaines régions françaises. Il n'était pas possible dans cette étude d'estimer précisément ces coûts.

Certaines des sous-actions sont assez incertaines sur leur potentiel de diffusion et d'adoption par les agriculteurs, hors scénario d'incitation ou de taxation financière. C'est le cas pour l'utilisation des engrais retard type engrais avec inhibiteur de nitrification, et pour l'enfouissement localisé de l'engrais. L'atténuation cumulée en 2030 est donc très sensible aux hypothèses faites sur la diffusion. Pour toutes ces actions, et en particulier pour celles demandant assez peu de technicité nouvelle (réduction des objectifs de rendement, retard d'une date d'apport, par exemple), la cinétique d'adoption pourrait évoluer très rapidement sous l'influence du prix des engrais et /ou de mesures financières visant à réduire la dépendance de l'agriculture aux engrais azotés de synthèse.

7.b. 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.

7.c. 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.

7.d. Interactions entre sous-actions et avec les autres actions

Le potentiel d'atténuation des sous-actions étudiées est constitué d'une part des effets des sous-actions sur la dose totale d'azote minéral apporté, et d'autre part des effets sur les réductions des pertes par volatilisation et lixiviation hors de la parcelle agricole. A ces effets s'ajoutent des effets induits amont importants sur les émissions liées à la fabrication et au transport des engrais azotés de synthèse.

Le Tableau 27 récapitule les cultures et les assiettes sur lesquelles ont porté l'estimation de ces sous-actions, ainsi que la réduction de la fertilisation minérale (kgN/ha/an) pour chacune des sous-actions.

Tableau 27. Récapitulatif des assiettes (hectare) concernées par chaque sous action, et de la réduction des quantités de fertilisant minéral (kgN/ha et kg N/an) par sous action

Assiette potentielle concernée (cultures)	surfaces totales	sous action 1		sous action 2	sous action 3		
		réduire fertilisation minérale		augmenter fertilis	améliorer efficacité fert Minerale		
		A1	A2	B	C 1	C 2	C 3
		méthode bilan	réduction intrant	prise en compte N org	date apport N	inhibiteur nitrifi	localisation
Blé tendre hiver	4782633	4782633	4782633	4782633	1530443	4782633	-
blé tendre printemps	41862	41862	41862	41862	-	41862	41862
Blé dur hiver	480337	480337	480337	480337	153708	480337	-
Blé dur printemps	12484	12484	12484	12484	-	12484	12484
Orge escourgeon d'hiver	1128669	1128669	1128669	1128669	101580	1128669	-
Orge de printemps	412651	412651	412651	412651	-	412651	412651
Colza	1429794	1429794	1429794	1429794	14298	1429794	-
Mais grain (ha)	1534464	1534464	1534464	1534464	-	1534464	1534464
Mais fourrage (ha)	1248812	1248812	1248812	1248812	-	1248812	1248812
Tournesol	486536	486536	486536	486536	-	-	-
Pommes de terre	153092	153092	153092	153092	-	153092	153092
betteraves	363636	363636	363636	363636	-	363636	363636
Riz	22521	22521	22521	-	-	-	-
total assiette (ha)	12097491	11711334	12097491	12074970	1800029	2317687	3767001
% de réalisation		100%	100%	100%	100%	100%	100%
	Fertilisation totale						
réduction fertilisation N/ ha	145	19.7	10.3	14.4	15.0	10.2	12.3
réduction ferti N /sous action	1754136183	230713278	124604156	173879567	27000430	23640405	46334112

Ces sous-actions ne sont pas additives à l'échelle France, parce que la mise en œuvre d'une sous-action diminue la quantité d'azote minéral épandue sur laquelle peuvent porter les atténuations suivantes, et/ou parce qu'elle peut diminuer l'assiette (ha) sur laquelle peut porter une autre sous-action. Nous proposons une logique de combinaison de ces sous-actions :

(i) la sous-action A1 est appliquée et diminue la dose totale d'azote à apporter, en fonction d'une révision des objectifs de rendements ;

(ii) la sous-action B tient mieux compte des apports organiques et améliore l'efficacité de ces apports (notamment en limitant la volatilisation d'ammoniac). Elle réduit la contribution de la fertilisation minérale à la dose totale calculée ;

(iii) enfin les sous-actions C améliorent l'efficacité de l'azote minéral apporté, notamment en manipulant les dates d'apport (C1), la vitesse de nitrification (C2) et en développant l'enfouissement localisé des apports d'azote minéral (C3).

Le potentiel d'atténuation et les coûts annuels et cumulés ont été calculés pour l'ensemble de l'action. La méthodologie utilisée a donc consisté à appliquer aux assiettes concernées pour les différentes cultures, les sous-actions dans l'ordre indiqué dans le Tableau 28, en tenant compte des interactions entre les sous-actions.

Tableau 28. Récapitulatif des valeurs obtenues en tenant compte des interactions entre sous-actions

Sous-action	Coût unitaire (€/ha)	Coût AMT2030 (€)	Atténuation AMT 2030 (MgCO _{2e})		Coût d'atténuation (€/MgCO _{2e})	
			"Citepa"	"expert"	"Citepa"	"expert"
Sous-action A1 Méthode bilan	-8,7	-101 362 453	2 218 726	2 592 417	-45,68	-39,10
Sous-action B Substitution orga.	-11,6	-139 963 660	1 669 334	1 530 594	-83,84	-91,44
Sous-action C1 Date apport	-22,7	-40 929 652	265 347	265 347	-154,25	-154,25
Sous-action C2 Inhibiteur	10,1	2 3384 489	176 411	403 888	132,56	57,90
Sous-action C3 Localisation	-8,4	-31 443 866	302 728	510 970	-103,87	-61,54
TOTAL action		- 290 315 142	4 632 546	5 303 216	-62,67	-54,74

Le calcul tenant compte des interactions entre sous-actions indique des atténuations 2030 de **4 632 546 à 5 303 216 MgCO_{2e}**, qui sont à comparer aux valeurs obtenues en sommant les atténuations 2030 des sous-actions (additivité complète) soit de **4 714 146 MgCO_{2e} à 6 086 760 MgCO_{2e}** pour les calculs "Citepa" et "expert", respectivement.

Le calcul tenant compte des interactions modifie dans certains cas légèrement le coût unitaire des sous-actions (certains coûts comme par exemple les épandages ne sont pas modifiés même si les quantités d'azote le sont), ce qui conduit à un

coût AMT 2030 de **-290 315 142 €** (c'est-à-dire un gain pour les agriculteurs) à comparer à la somme des coûts des sous-actions considérées individuellement (hors sous-action A2) de **-279 880 781 €**.

Un exemple de combinaison possible de ces sous-actions peut être fait sur le blé tendre d'hiver, qui représente le tiers des surfaces ayant servi dans cette étude aux calculs d'atténuation de cette action. Une révision des rendements, associée à un retard de la date du premier apport et à l'usage d'un inhibiteur, permettrait de réduire l'apport de 40 kgN/ha/an environ, soit environ 25% de l'apport d'azote minéral.

Une révision des rendements sur maïs, combinée à une meilleure substitution de l'azote minéral par l'azote organique et à un enfouissement de l'azote apporté, conduirait à une réduction de l'apport d'azote minéral d'environ 36 kgN/ha en moyenne, soit 23% de l'apport d'azote minéral moyen.

Le statut de la sous-action A2 est particulier, puisque nous avons chiffré l'atténuation permise par la mise en œuvre d'un plan d'action dont la logique n'est pas l'atténuation des GES, mais la réduction des intrants phytosanitaires. Il en ressort néanmoins que cette réduction d'intrants par ailleurs souhaitée au plan national, a un effet positif en termes d'atténuation, même si les pertes de rendement observées rendent cette sous-action coûteuse comparée aux autres sous-actions examinées ici. Cette sous-action n'est pas additive avec la sous-action A1 mais en constitue une option technique. Un agriculteur qui envisage la limitation de l'usage des produits phytosanitaires sera conduit à réviser à la baisse ses objectifs de rendement, et d'après les données utilisées dans cette étude, cette baisse des rendements représente environ 50% de la baisse des objectifs de rendements utilisée dans la sous-action A1.

7.e. Autres effets attendus de l'action, synergies/antagonismes avec l'adaptation au changement climatique et avec d'autres objectifs de politique publique

Les sous-actions proposées dans le cadre de la gestion de la fertilisation minérale azotée conduisent à diminuer la contribution des engrais minéraux azotés de synthèse à la nutrition azotée des cultures. Elles conduisent *de facto* à réduire potentiellement les excédents de fertilisation azotée. Elles s'inscrivent donc aussi 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, qui s'appuie sur la directive 91/676/CEE dite directive "nitrates". Au sein d'un ensemble de mesures obligatoires pour les zones "vulnérables", on retrouve l'allongement des durées d'interdiction d'épandage des fertilisants azotés, et un renforcement de la mise en œuvre de l'équilibre de la fertilisation azotée à la parcelle.

Certains volets de cet action sont aussi mobilisés dans le cadre des politiques publiques en matière de réduction des intrants phytosanitaires (-50% à l'horizon 2018), qui conduisent à des modes de production intégrés, impliquant une diminution des objectifs de rendement et donc des besoins en azote par unité de surface.

Enfin, nous n'avons pas tenu compte dans nos calculs d'un scénario d'augmentation des surfaces en agriculture biologique qui conduit à diminuer les quantités d'azote minéral des engrais de synthèse. L'objectif du Grenelle de l'environnement était d'atteindre 6% de surface agricole utile (SAU) en agriculture biologique pour 2012. Or, en 2011, malgré une forte hausse des exploitations converties au bio, ce type d'agriculture ne représentait que 4,6% des surfaces. Dans le cadre du grand chantier "Produire autrement", l'objectif est le doublement des surfaces en agriculture biologique d'ici 2017. Il nous semble cependant qu'il y a, à court terme, peu d'impact en termes d'atténuation potentielle des gaz à effet de serre, les surfaces concernées étant limitées à l'échelle de la France pour ce qui est des grandes cultures.

8. Conclusions

L'action "*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 été explorée à travers 3 volets représentant des leviers d'action de natures différentes, c'est-à-dire (i) mieux mettre en œuvre la fertilisation raisonnée afin de réduire les excès d'azote, (ii) accroître la substitution de la fertilisation minérale de synthèse par l'azote des produits et effluents organiques et (iii) accroître l'efficacité d'utilisation de l'azote apporté par les cultures en jouant sur les techniques de fertilisation. Nous n'avons pas quantifié toutes les options techniques, et celles choisies l'ont été soit en raison de leur large potentiel d'application (assiette), soit de leur important potentiel d'atténuation, mais ce choix est finalement cohérent avec ceux réalisés dans d'autres études à l'étranger (cf. section 2c). De même, les calculs n'ont pas été réalisés sur l'ensemble de la SAU hors légumineuses et prairies (faisant l'objet d'actions spécifiques dans cette étude), mais sur 82% de celle-ci, car il était nécessaire d'avoir des références agronomiques et techniques assez précises disponibles pour pouvoir proposer des solutions agronomiques adaptées : la vigne, l'arboriculture, les cultures légumières et maraîchères, les cultures industrielles (tabac, houblon, chicorée), les plantes aromatiques, les choux et tubercules et les jachères industrielles ont été écartés ; ils représentent environ 2,5 Mha. Ceci

signifie que le potentiel d'atténuation à l'échelle France associé à une réduction de la fertilisation minérale des cultures est un peu sous-estimé.

D'après notre analyse, le potentiel de réduction de la fertilisation minérale sans affecter les rendements est important, et représente, pour la plupart des sous-actions, une solution gagnant-gagnant, car la réduction de la fertilisation s'accompagne d'une réduction des coûts pour l'agriculteur. Ceci deviendrait d'autant plus vrai que le prix des intrants minéraux augmenterait avec l'augmentation attendue du coût de l'énergie. Il y a donc une marge de progrès considérable sans affecter les rendements. Ces sous-actions représentent chacune des atténuations (directes + induites) de l'ordre de 0,30 MgCO₂e/ha/an à 0,15 MgCO₂e/ha/an par le calcul "Citepa", et 0,33 à 0,18 MgCO₂e/ha/an par le calcul "expert". Ces données sont à rapprocher des potentiels d'atténuation proposés dans des études similaires, et nous voyons que ces estimations sont très proches (voir Tableau 2).

Même avec ces simplifications, cette action reste complexe, parce qu'elle met en jeu une grande diversité de systèmes de culture, climats, pratiques culturales. La gestion de la nutrition azotée des cultures est le plus souvent assez spécifique du type de culture, du sol et du climat concernés. Les pratiques de fertilisation conduisant à des pertes significatives vers l'atmosphère sont généralement associées à un faible recouvrement par la culture, soit par défaut de synchronisation de la disponibilité avec les besoins en azote, soit en raison d'apports excessifs d'azote par rapport aux besoins (soit les deux). Ils résultent en partie des aléas liés au climat (et dans une moindre mesure à la connaissance de la quantité et de la nature des produits organiques épandus), aléas qui conduisent souvent à chercher à minimiser les risques de pertes de rendement en augmentant les doses d'azote. C'est pourquoi les pratiques visant à diminuer les risques de pertes (notamment par volatilisation d'ammoniac) doivent à tout prix être favorisées. L'analyse présentée ici n'a pas pris en compte l'influence des conditions pédologiques sur l'intensité des flux, du fait de la nécessité en amont de consolider les connaissances relatives au déterminisme de ces flux par les paramètres pédologiques.

L'analyse présentée montre aussi que les approches favorables à l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre sont aussi des mesures favorables à la limitation de la contamination des eaux superficielles et souterraines par les excès de nitrate. Ceci suppose que des pratiques encore étudiées et/ou appliquées de manière relativement confidentielles (par exemple, l'application localisée de l'engrais dans le sol, l'utilisation d'inhibiteurs de nitrification) 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 qui étaient, d'après l'enquête "Pratiques culturales" 2006, très faiblement mises en œuvre à l'échelle de la France (7% des surfaces) ; et qui montrent leur intérêt dans la réduction de la dose totale d'azote, comme le montre l'étude réalisée avec l'outil *Epiclès*®.

Du point de vue des inventaires, nous observons que la méthode de calcul actuelle (fondée sur les recommandations IPCC 1996) qui ne tient compte que des quantités d'azote apportées pour calculer les émissions, minimise les effets des pratiques sur les émissions de GES. Ceci revient à réduire l'intérêt de pratiques très intéressantes pour les atténuations (telle que l'usage d'inhibiteurs de nitrification, ou l'apport localisé de l'azote dans le sol).

Références bibliographiques citées

- ADEME, 2007. La production de déchets organiques en France.
- AGRESTE 2010. Pratiques culturales 2006. Les dossiers n°8 ; Juillet 2010.
- Agreste Alsace, 2008. La fertilisation azotée sur le blé en Alsace. Novembre 2008. DRAF/SRISE Alsace.
- Agreste Bretagne 2008. Concentration de l'excédent azotée sur les prairies et sur le maïs. Juin 2008, DRAF/SRISE Bretagne.
- Agreste Centre Informations. 2008. Enquêtes pratiques culturales 2006. N°124, Août 2008. Direction Régionale de l'agriculture et de la forêt (DRAF/SRISE Centre).
- Agreste Chiffres et Données Agriculture, n° 200, août 2008, « Enquête sur les pratiques culturales en 2006 ».
- Agreste Conjoncture 2012. Campagne culturale 2011/2012 : recul des livraisons d'engrais malgré des prix agricoles favorables. Agreste Synthèses - Moyens de production - Juin 2012, n° 2012/180.
- Agreste Données Midi-Pyrénées. 2008. Amélioration des pratiques de fertilisation minérale azotée. N°50. DRAF/SRISE Midi-Pyrénées.
- Agreste Pays de Loire, 2008. Amélioration des pratiques de fertilisation. Juin 2008. DRAF/SRISE Pays de la Loire et Loire-Atlantique.
- Agreste Picardie, 2008. Les pratiques culturales 2006 sur blé tendre d'hiver en Picardie : la gestion de l'azote toujours plus raisonnée. Les feuilles de liaison n°27, Novembre 2008. DRAF/ SRISE Picardie.
- Agreste Primeur, 2008. Fertilisation azotée minérale du maïs grain : progrès attendus. n°216, Ministère de l'Agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt.
- Agreste Primeur, 2012. Pratiques culturales et livraison d'engrais azotés depuis les années quatre-vingt-dix. Service de la statistique et de la prospective. N° 291, Ministère de l'Agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt.
- Agricultures et Territoires, Chambre d'Agriculture de la Somme, 2011. Préconisations sur cultures de printemps 2011. Cahier technique, Février 2011.
- Akiyama H., Yan X., Karuyuki Y. 2010. Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis. *Global Change Biology* 16, 1837-1846.
- Akiyama, H., X. Yan, et al. (2010). "Evaluation of effectiveness of enhanced-efficiency fertilizers as mitigation options for N₂O and NO emissions from agricultural soils: meta-analysis." *Global Change Biology* 16(6): 1837-1846.
- Béline F., Delaby L., Vertès F. et al. 2012. Transformation, devenir et valorisation de l'azote : des effluents d'élevage aux systèmes de culture. In J.-L. Peyraud, P. Cellier, C. Donnars, O. Réchauchère (éditeurs), 2012. Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France), Chapitre 6, p 229-294.
- Berthoud A., 2010a. Note d'idée de Projet, Projet Domestique CO₂ - Réalisation d'un plan de fumure pour la fertilisation azotée d'une parcelle agricole. Direction Agriculture Durable et Développement, InVivo, Paris.
- Berthoud A., 2010b. Note d'idée de Projet, Projet Domestique CO₂ - Changement de formes d'engrais azotés sur grandes cultures. Direction Agriculture Durable et Développement, InVivo, Paris.
- Blackmer, A., Bremner JM, et al. 1980. "Production of nitrous oxide by ammonia oxidizing chemoautotroph microorganisms in soil." *Applied and Environmental Microbiology* 40: 1060-1066.
- Cazeneuve P., Mahé T., Vert J., 2010. Le marché des engrais minéraux : état des lieux, perspectives et pistes d'action. Analyse n°15, Centre d'études et de prospective, Avril 2010. Service de la Statistique et de la Prospective. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.
- Chambers B., Dampney P., 2009. Nitrogen efficiency and Ammonia emissions from urea-based and ammonium nitrate fertilizers. *Proceedings of the International Fertilizer Society* n° 657, York, UK, 20 pages.
- Chambre d'Agriculture de Bretagne, Arvalis Institut du Végétal, INRA, 2012. Trente ans de références pour comprendre et limiter les fuites d'azote à la parcelle. Actes de la journée de synthèse scientifique du 3 février 2012, Ploërmel. www.synagri.com, 40 pages
- Chambre d'Agriculture de la Marne, 2011. Betteraves : produire plus avec moins d'azote c'est possible. Cahiers Techniques. Printemps 2011.
- Chataigner J., Mouret J.-C., 1997. Recherches et production rizicole en France. *Cahiers Options Méditerranéennes*, 24, n°2, 117-126.
- CITEPA, 212. Organisation et méthodes des inventaires nationaux des émissions atmosphériques en France. 9ème édition / Taux d'application des techniques d'épandage pour les effluents d'élevage . *OMINEA_4B_manure management_R/2* . Facteurs d'émission. Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement.
- Clough T.J., Di, H.J. et al., 2007. "Accounting for the utilization of a N₂O mitigation tool in the IPCC inventory methodology for agricultural soils." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 78(1): 1-14.
- Cohan J.P., 2013. Engrais azotés sur blé. De nouvelles formes solides au banc d'essai. *Perspectives Agricoles*, 396.
- Cohan J.P., Labreuche J., Bouthier A., 2012. Orge de printemps. La localisation de l'azote utile surtout en conditions difficiles. *Perspectives Agricoles*, 385.
- Cohan J.P., Le Souder C., 2013. Formes d'azote. Ammonitrate, solution azotée ou urée : les bons critères de choix. *Perspectives Agricoles*, 396.
- COMIFER, 2012. Raisonnement de la fertilisation azotée par la méthode du bilan . <http://www.comifer.asso.fr>
- Commissariat général au développement durable, 2012. L'analyse spatiale des pressions agricoles : surplus d'azote et gaz à effet de serre. *Observations et Statistiques*, collection « Un point sur » n°113, Mars 2012.
- Commissariat général au développement durable, 2013. Les surplus d'azote et les gaz à effet de serre de l'activité agricole en France métropolitaine en 2010. *Observations et Statistiques*, collection «Chiffres et Statistiques» n°448, Septembre 2013.
- Dalal R., Baldock J., Bell M., Grace P., 2009. Build soil carbon storage and mitigate nitrous oxide and methane emissions for cropped land. In : *An Analysis of Greenhouse Gas Mitigation and Carbon Biosequestration Opportunities from Rural Land Use*. National Research Sustainable Agriculture, CSIRO, pp46-60.
- Di H.J., K. C. Cameron, 2003. "Mitigation of nitrous oxide emissions in spray-irrigated grazed grassland by treating the soil with dicyandiamide, a nitrification inhibitor." *Soil Use and Management* 19(4): 284-290.
- Dittert, K., R. Bol, et al. 2001. "Use of a novel nitrification inhibitor to reduce nitrous oxide emission from N-15-labelled dairy slurry injected into soil." *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 15(15): 1291-1296.

- Dobbie, K. E. and K. A. Smith (2003). "Impact of different forms of N fertilizer on N₂O emissions from intensive grassland." *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 67(1): 37-46.
- Drury, C. F., W. D. Reynolds, et al. (2006). "Emissions of nitrous oxide and carbon dioxide: influence of tillage type and nitrogen placement depth." *Soil Science Society of America Journal* 70(2): 570-581.
- Duarnd P., Cellier P., Peyraud J.L., Kuikman P. 2012. Les flux d'azote au sein des territoires et le rôle de l'élevage. In J.-L. Peyraud, P. Cellier, C. Donnars, O. Réchauchère (éditeurs), 2012. Les flux d'azote liés aux élevages, réduire les pertes, rétablir les équilibres. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France), Chapitre 2, p 79-118.
- 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
- EMEP/EEA Emission inventory guidebook 2009. Updated June 2010
- Engel R., L. D., et al. (2008). "Effect of Granular Urea Placement on Nitrous Oxide Production from a Silt Loam Soil." *Fertilizer Facts* 50.
- Flynn H., Smith P., Bindi M., Trombi G., Oudendag D., Rousseeva S., 2007. Policy incentives for climate change mitigation agricultural techniques. Practices description and analysis report. Project co-funded by the European Commission within the Sixth Framework Programme (2002-2006).
- Garrido, F., C. Henault, et al. (2002). "N₂O and NO emissions by agricultural soils with low hydraulic potentials." *Soil Biology & Biochemistry* 34(5): 559-575.
- 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)
- ITB, 2008 L'enfouissement localisé de l'azote : Des atouts économiques. La technique betteravière n° 901 du 21 Octobre 2008.
- ITB, 2009. L'enfouissement localisé de l'azote est toujours d'actualité. La technique betteravière n° 926 du 17 février 2009.
- Johnston, A. (2005). Nitrous oxide emissions from fertilizer nitrogen. *News & Views*.
- Lagarde F. Champolivier L. 2006. Le raisonnement et les avancées techniques permettent de réduire la fertilisation azotée : le cas de Farmstar-Colza. OCL 13, 6, Novembre-Décembre 2006, 384-387.
- Laville, P., H. C., et al. (1997). "Field comparison of nitrous oxide emission measurements using micrometeorological and chambers methods." *Agronomie* 17: 375-388.
- Le Souder C., Taureau J.C. 1997. Formes d'engrais : Quelle incidence sur le rendement et la teneur en protéines du blé tendre d'hiver. *Perspectives Agricoles*, 221.
- Li, H., Y. Chen, et al. (2009). "Mineral-nitrogen Leaching and Ammonia Volatilization from a Rice-Rapeseed System as Affected by 3,4-Dimethylpyrazole Phosphate." *Journal of Environmental Quality* 38(5): 2131-2137.
- Linzmeier, W., R. Gutser, et al. (2001). "Nitrous oxide emission from soil and from a nitrogen-15-labelled fertilizer with the new nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP)." *Biology and Fertility of Soils* 34(2): 103-108.
- Liu, X. J., A. R. Mosier, et al. (2006). "The impact of nitrogen placement and tillage on NO, N₂O, CH₄ and CO₂ fluxes from a clay loam soil." *Plant and Soil* 280(1-2): 177-188.
- Macadam, X. M. B., A. del Prado, et al. (2003). "Dicyandiamide and 3,4-dimethyl pyrazole phosphate decrease N₂O emissions from grassland but dicyandiamide produces deleterious effects in clover." *Journal of Plant Physiology* 160(12): 1517-1523.
- Machet J.M., Pierre D., Recous S., Rémy J.C., 1987. Signification du coefficient réel d'utilisation et conséquences pour la fertilisation azotée des cultures. *Comptes-rendus de l'Académie d'Agriculture de France* 73, 3, 39-55
- Menendez, S., P. Merino, et al. (2006). "3,4-dimethylpyrazol phosphate effect on nitrous oxide, nitric oxide, ammonia, and carbon dioxide emissions from grasslands." *Journal of Environmental Quality* 35(4): 973-981.
- Millar, N., G. P. Robertson, et al. (2010). "Nitrogen fertilizer management for nitrous oxide (N₂O) mitigation in intensive corn (Maize) production: an emissions reduction protocol for US Midwest agriculture." *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 15(2): 185-204.
- Milou C., Lecocq B. 2010. Qu'attendre des nouvelles formes d'azote ?. *Relations Cultures* n°99, Septembre 2010.
- Nash, P. R., P. P. Motavalli, et al. (2012). "Nitrous Oxide Emissions from Claypan Soils Due to Nitrogen Fertilizer Source and Tillage/Fertilizer Placement Practices." *Soil Science Society of America Journal* 76(3): 983-993.
- Philibert, A., C. Loyce, et al. (2012). "Quantifying Uncertainties in N₂O Emission Due to N Fertilizer Application in Cultivated Areas." *Plos One* 7(11).
- Philippot, L. and J. C. Germon (2005). *Contribution of bacteria to initial input and cycling of nitrogen in soils*. A. V. F. Buscot, Springer: 159-176.
- Reay, D.S., Davidson E.A., Smith K.A., Smith P., Melillo J.M., Dentene F., Crutzen P.J. Global agriculture and nitrous oxide emissions. *Nature climate change*, 2; June 2012, 410-416. Doi: 10.1038/nclimate1458
- Recous S., Loiseau P., Machet J.-M., Mary B., 1997. Transformations et devenir de l'azote de l'engrais sous cultures annuelles et sous prairies. In "Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes", (G. Lemaire et B. Nicolardot eds), Les Colloques 83, INRA, Paris, 105-120.
- Recous S., Machet J.M. (1999) Short-term immobilisation and crop uptake of fertiliser-N applied to winter wheat : effect of date of application in spring. *Plant and Soil* 206, 2, 137-149.
- Relations Culture (2010) : Dossier technique sur les engrais enrobés, et avec inhibiteurs. Fertilisation . Qu'attendre des nouvelles formes d'azote. Engrais retard : une simplification du travail avant tout. Septembre 2010. n° 99.
- Schneider A., Flénet F., Dumans P., Bonnin E., De Chezelles E., Jeuffroy M-H., Hayer F., Nemecek T., Carrouée B. 2010. Diversifier les rotations céréalières notamment avec du pois et du colza- Données récentes d'expérimentations et d'études. OCL 17, 5, Septembre-Octobre 2010. 301-311.
- Smith K.A., D. K. E., Thorman R., Watson C.J., Chadwick D.R., Yamulki S., Ball B.C., 2012. "The effect of N fertilizer forms on nitrous oxide emissions from UK arable land and grassland." *Nutr. Cycl. Agroecosyst* 93: 127-149.
- Smith P., Martino D., Cai Zucong, Gwary D., Janzen H., Kumar P, McCarl B., Ogle S., O'Mara F., Rice C., Scholes B., Sirotenko O., Howden M., Mcallister T., Pan G., Romanenkova V., Schneider U., Towprayoon S., Wattenbach M; Smith J., 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Phil. Trans.R. Soc. B*, 363, 789-813.

- Sylvester-Bradley R., Kindred D. R., Wynn S. C., Thorman R. E., Smith K. E, 2012. Efficiencies of nitrogen fertilizers for winter cereal production, with implications for greenhouse gas intensities of grain. *The Journal of Agricultural Science*, pp 1- 20. DOI: 10.1017/S0021859612000810
- Stehfest, E. and L. Bouwman (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(3): 207-228.
- Subbarao, G. V., K. L. Sahrawat, et al. (2012). Biological nitrification inhibition-a novel strategy to regulate nitrification in agricultural systems. *Advances in Agronomy*, Vol 114. D. L. Sparks. 114: 249-302.
- Tenuta, M. and E. G. Beauchamp (2003). "Nitrous oxide production from granular nitrogen fertilizers applied to a silt loam." *Canadian Journal of Soil Science* 83(5): 521-532.
- Thomas F. 2010 Gestion de l'azote en TCS et semis direct. *Techniques Culturelles Simplifiées*. n° 59, septembre/octobre 2010.
- Thomas F. 2011 Localisation de la fertilisation : maintenant une évidence. *Techniques Culturelles Simplifiées* n° 61. Janvier/Février 2011.
- UNIFA 2010. Evolution de la fertilisation en France et bilans régionaux depuis 20 ans. Unifa (www.unifa.fr)
- UNIFA 2011. Les livraisons d'engrais minéraux en France Métropolitaine. Campagne 2010-2011.
- Vallejo, A., U. M. Skiba, et al. (2006). "Nitrogen oxides emission from soils bearing a potato crop as influenced by fertilization with treated pig slurries and composts." *Soil Biology & Biochemistry* 38(9): 2782-2793.
- Van Groenigen, J. W., G. L. Velthof, et al. (2010). "Towards an agronomic assessment of N₂O emissions: a case study for arable crops." *European Journal of Soil Science* 61(6): 903-913.
- Venterea, R. T., M. Burger, et al. (2005). "Nitrogen oxide and methane emissions under varying tillage and fertilizer management." *Journal of Environmental Quality* 34(5): 1467-1477.
- Watson, C.J., Laughlin, R.J., McGeough, K.L. (2009). "Modification of nitrogen fertilizers using inhibitors: opportunities and potentials form improving nitrogen use efficiency. *Proceedings 658, International Fertiliser Society, York, UK, 40 pages.*
- Zaman, M., S. Saggarr, et al. (2009). "Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system." *Soil Biology & Biochemistry* 41(6): 1270-1280.
- Zerulla W., B. T., Dressel J., Erhardt K., Horchler von Locquenghien K., Pasda G., Rädle M., Wissemeier A.H. (2001). "3,4-Dimethylpyrazole phosphate (DMPP) – a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture. An introduction." *Biol. Fertil. Soils* 34: 79-84.

Annexe 1. Sous-action A1 : Réduire les apports d'engrais azoté de synthèse

Calcul de l'atténuation unitaire permise par la diminution du rendement espéré avec les grandes cultures

La réduction moyenne est de 20 kgN/ha, sauf pour le tournesol où la réduction est de 13 kgN/ha (voir description de la mesure). On calcule les émissions avec et sans la mesure ; la différence entre les deux correspond à l'atténuation permise par la mesure. Les calculs sont effectués à partir des données SAA 2010 pour les surfaces cultivées à l'échelle France, RICA 2010 pour les rendements et le prix, et de l'enquête "Pratiques culturales" 2006 pour le pourcentage de surfaces fertilisées ainsi que la dose moyenne d'azote minéral apportée par hectare (voir Tableau A1-IV). Ceci permet de calculer l'assiette des surfaces, ainsi que les quantités d'azote concernées. C'est ce calcul qui a été retenu principalement. Les fourchettes basses et hautes (Tableau A1-I) sont calculées à partir de valeurs basses et hautes de surestimation des rendements.

Tableau A1-I. Synthèse des données pour le calcul d'atténuation

Somme des surfaces concernées en France (ha)	11 711 333
Quantité totale d'N apporté SANS (kg N)	1 707 437 019
Quantité totale d'N apporté AVEC (kg N)	1 476 616 107 (1 534 686 237 - 1 363 395 061)*
Réduction moyenne passage d'épandeur	0
Réduction fuel	0
Réduction rendements	0
Réduction emploi phytosanitaires (kg m.a.)	5 185 664
Réduction apport N (kg)	230 820 912 (172 750 782 - 344 041 958)*
Réduction apport N (kg/ha)	19,7 (19,4 - 29,4)

* valeurs basses et hautes de la fourchette retenue pour l'estimation

Calcul de l'atténuation unitaire permise par la mise en œuvre systématique d'un pilotage de la fertilisation azotée

L'exemple choisi est une étude menée par la coopérative InVivo avec l'outil Epiclès. On estime l'atténuation en utilisant les écarts entre les doses apportées dans le cadre de la mise en œuvre de l'outil, et les données moyennes de fertilisation azotée (Enquête "Pratiques culturales" 2006). On applique les réductions observées à l'ensemble de la sole des cultures à l'échelle France.

On estime l'atténuation potentielle avec, pour l'assiette :

- une hypothèse basse (1) : l'amélioration potentielle s'applique aux surfaces qui sont actuellement fertilisées à "la dose habituelle",
- une hypothèse haute (2) : l'amélioration s'applique aux surfaces qui n'utilisent actuellement pas d'outil de pilotage de la fertilisation azotée.

Tableau A1-II. Synthèse des données, calcul "Epiclès"

	Hypothèse (1)	Hypothèse (2)
Somme des surfaces concernées ha/ France	1 220 701	15 614 903
Quantité totale d'N apporté SANS (kg N)	1 746 709 734	1 746 709 734
Quantité totale d'N apporté AVEC (kg N)	1 727 451 224	1 590 684 134
Réduction moyenne passage d'épandeur	0	0
Réduction fuel	0	0
Réduction rendements	0	0
Réduction apport N (kg)	19 258 509	156 025 599
Réduction apport N (kg/ha)	1,6	12,9

Annexes

Tableau A1-III. Calculs d'atténuation

(ces chiffres ne sont détaillés que pour la valeur centrale de l'estimation)

Calcul "Citepa"	total SANS	total AVEC	total différence	/ha SANS	/ha AVEC	/ha différence
Emission directe (kgCO ₂ e)	9 348 857 967	8 085 026 915	1 263 831 052	798	690	108
Emission indirecte via volatilisation	831 009 597	718 669 059	112 340 538	71	61	10
Emission indirecte via lixiviation	6 232 571 978	5 390 017 943	842 554 034	532	460	72
Total kgCO₂e	16 412 439 542	14 144 403 439	2 268 036 103	1401	1212	189
MgCO₂e	16 412 440	14 144 403	2 268 036	1,401	1,212	0,189
Emission amont via production fertilisants	9 057 953 385	7 833 448 446	1 224 504 939	773	668	105
Emission via pesticides	0	-49 310 479	49 310 479	0	-4	4
Total MgCO₂e amont induit	9 057 953	7 882 758	1 175 194	0,773	0,664	0,109
TOTAL			3 541 852			0,298

Calcul "expert"	total SANS	total AVEC	total différence	/ha SANS	/ha AVEC	/ha différence
Emission directe (kgCO ₂ e)	10 653 190 741	8 409 391 726	2 243 799 015	910	718	192
Emission indirecte via volatilisation	793 480 131	686 213 037	107 267 094	68	59	9
Emission indirecte via lixiviation	1 785 330 296	1 543 979 333	241 350 962	152	132	21
Total kgCO₂e	13 232 001 168	10 590 273 617	2 641 727 550	1 130	908	221
MgCO₂e	19 522 977	10 590 274	2 641 728	1,130	0,91	0,221
Emission amont via production fertilisants	9 057 953 385	7 833 448 446	1 224 504 939	773	668	105
Emission via pesticides	0	-49 310 479	49 310 479	0	-4	4
Total MgCO₂e amont induit	9 057 953	7 784 137	1 273 815	0,773	0,668	0,109
TOTAL			3 915 543			0,330

Annexes

Tableau A1-IV. Données agronomiques utilisées pour les calculs de la sous-action A1

Cultures			Surfaces fertilisées	N total (kg)	Réduction N (kg/ha)	N' total (kg)	Réduction Epiclès (kgN/ha)	% surface calcul dose habituelle	Surface concernées par le gain (ha)		Q N concernées (kgN)	
									Hyp. (1)	Hyp. (2)	Hyp. (1)	Hyp. (2)
Blé tendre	surfaces totales	4 922 954	4 824 495	796 041 662	- 20	699 551 763	5	8	385960	4486780	1 929 798	22 433 901
	surfaces fertilisées	98%										
	fertilisation actuelle kgN/ha	165										
	nb passages actuels / une saison	3,1										
Blé dur	surfaces totales	502 879	492 821	86 736 570	- 20	76 880 142	8	13	64 067	478 037	512 534	3 824 294
	surfaces fertilisées	98%										
	fertilisation actuelle kgN/ha	176										
	nb épandages / culture	2,3										
Orge et escourgeon	surfaces totales	1 572 775	1 541 320	200 371 535	- 20	169 545 145	11	8	123 306	1 495 080	1 356 361	16 445 879
	surfaces fertilisées	98%										
	fertilisation actuelle kgN/ha	130										
	nb épandages / culture	2,5										
Colza	surfaces totales	1 458 973	1 429 794	235 915 934	- 20	207 320 063	19	4	57 192	1 386 900	1 086 643	26 351 095
	surfaces fertilisées	98%										
	fertilisation actuelle kgN/ha	165										
	nb épandages / culture	2,5										
Maïs grain	surfaces totales	1 598 400	1 534 464	239 376 384	- 20	208 687 104	25	12	184 136	1 488 430	4 603 392	37 210 752
	surfaces fertilisées	96%										
	fertilisation actuelle kgN/ha	156										
	nb épandages / culture	1,6										
Maïs fourrage	surfaces totales	1 403 160	1 248 812	97 407 367	- 20	72 431 119	25	18	224 786	1 211 348	5 619 656	30 283 701
	surfaces fertilisées	89%										
	fertilisation actuelle kgN/ha	78										
	nb épandages / culture	1,6										
Tournesol	surfaces totales	695 051	486 536	27 245 999	- 13	20 921 035	24	31	150 826	471 940	3 619 826	11 326 551
	surfaces fertilisées	70%										
	fertilisation actuelle kgN/ha	56										
	nb épandages / culture	0,9										
Pommes de terre	surfaces totales	154 638	153 092	24 341 568	- 20	21 279 735	24	8	12 247	148 499	293 936	3 563 973
	surfaces fertilisées	99%										
	fertilisation actuelle kgN/ha	159										
	nb épandages / culture	2,2										

Annexe 2. Sous-action A2 : Réduire la fertilisation azotée dans le cadre d'une réduction d'intrants phytosanitaires

Cette option technique correspond à la mise en place d'un scénario de réduction d'intrants (scénario "N2a" tel que caractérisé et chiffré dans le rapport Ecophyto R&D). Les données quantitatives sur la réduction des intrants phytosanitaires et des engrais et sur la réduction des rendements sont fournis par le dossier "Grandes cultures" de ce rapport (<http://www5.paris.inra.fr/depe/Projets/Ecophyto-R-D>). Les calculs sont effectués à partir des données SAA 2010 pour les surfaces cultivées à l'échelle France, RICA 2010 pour les rendements et de l'enquête "Pratiques culturales" 2006 pour le pourcentage de surfaces fertilisées ainsi que la dose moyenne d'azote minéral apportée par hectare. Les diminutions de fertilisation sont calculées pour les cultures en utilisant les moyennes des données disponibles par zone climatique du rapport Ecophyto R&D pondérées des surfaces de ces zones par culture. Les écarts-types sur les rendements obtenus dans l'étude Ecophyto R&D ($\pm 21\%$ en moyenne) sont utilisés pour estimer une valeur basse et une valeur haute autour de la réduction de la fertilisation azotée, et donc de l'atténuation moyenne. On utilise les données statistiques sur les matières actives pour calculer l'impact *via* la réduction de pesticides.

Tableau A2-I. Synthèse des données pour le calcul d'atténuation

Somme des surfaces concernées en France (ha)	12 097 490
Quantité totale d'N apporté SANS (kg N)	1 745 574 851
Quantité totale d'N apporté AVEC (kg N)	1 620 947 157 (1 647 386 144 - 1 595 255 493)
Réduction moyenne passage d'épandeur	0,31
Réduction fuel	4 572 369
Tonnage substances actives	20 565 734
Réduction substances actives (kg m.a.)	6 992 349
Réduction apport N (kgN)	124 627 695 (98 188 708 - 150 319 358)
Réduction apport N (kgN/ha)	10,3 (8,1 - 12,4)

Tableau A2-II. Effets de la réduction des intrants phytosanitaires (scénario "N2a") sur les rendements, la fertilisation azotée et le nombre d'épandages pour les grandes cultures

Données Etude Ecophyto R&D (2009)

Zone géographique	1	2	3	4	moyenne pondérée
Blé tendre (ha)	2126739	1786930	261200	455644	4630513
fertilisation actuelle U/ha	172	152	145	145	160
fertilisation N2a	158	143	137	137	149
nb passages actuels /saison	3,1	2,9	2,9	2,8	3,0
nb passages N2a	2,1	2,9	2,9	2,8	2,5
rendements actuels (Qx / ha)	78	68	69	61	72
rendements N2a	73	65	65	58	68
Blé dur (ha)	50840	65300	199194	-	315334
fertilisation actuelle	124	156	191	-	173
fertilisation N2a	135	167	173	-	165,6
nb passages actuels	2,3	3,3	3,6	-	3,3
nb passages N2a	2,3	3,3	3,0	-	2,9
rendements actuels	28,5	36,7	68	-	55
rendements N2a	31,8	40	64	-	54
Orge de printemps (ha)	56664	4700	346136	-	407500
fertilisation actuelle	108	117	117	-	116
fertilisation N2a	85	113	113	-	109
nb passages actuels	1,8	1,8	1,8	-	1,8
nb passages N2a	1	1,5	1,5	-	1,4
rendements actuels	68	59	59	-	60
rendements N2a	64	56	56	-	57
Orge d'hiver (ha)	183556	41930	740144	-	965630
fertilisation actuelle	143	101	130	-	131
fertilisation N2a	129	109	123	-	124
nb passages actuels	2,5	2,2	2,5	-	2,5
nb passages N2a	2	1,5	1,8	-	1,8
rendements actuels	77	47	67	-	68
rendements N2a	71	50	64	-	65

Annexes

Colza (ha)	154411	793691	148498	-	1096600
fertilisation actuelle	160	161	168	-	162
fertilisation N2a	139	133	152	-	136
nb passages actuels	2,5	2,9	2,9	-	2,8
nb passages N2a	2,5	2,9	2,9	-	2,8
rendements actuels	30	31	29	-	30
rendements N2a	27	26	26	-	26
Maïs grain (ha)	359825	988619			1348444
fertilisation actuelle	113	168	-	-	153
fertilisation N2a	106	165	-	-	149
nb passages actuels	1,6	2,3	-	-	2,1
nb passages N2a	1,6	2,3	-	-	2,1
rendements actuels	82	93	-	-	90
rendements N2a	78	91	-	-	88
Tournesol (ha)					
fertilisation actuelle	39	-	-	-	39
fertilisation N2a	39	-	-	-	39
nb passages actuels	0,9	-	-	-	0,9
nb passages N2a	0,5	-	-	-	0,5
rendements actuels	23	-	-	-	23
rendements N2a	23	-	-	-	23
Pommes de terre					
fertilisation actuelle	155	-	-	-	155
fertilisation N2a	119	-	-	-	119
nb passages actuels	2,2	-	-	-	2,2
nb passages N2a	2,5	-	-	-	2,5
rendements actuels	41	-	-	-	41
rendements N2a	34	-	-	-	34
Betterave					
fertilisation actuelle	105	-	-	-	105
fertilisation N2a	100	-	-	-	100
nb passages actuels	1,8	-	-	-	1,8
nb passages N2a	1,0	-	-	-	1
rendements actuels	77	-	-	-	77
rendements N2a	74	-	-	-	74
Riz	22521	-	-	-	22521
fertilisation actuelle	150	-	-	-	150
fertilisation N2a	135	-	-	-	135
nb de passages actuels	3	-	-	-	3
nb de passages N2a	2	-	-	-	2
réduction rendements*	0,05	-	-	-	0,05
réduction fertilisation*	0,10	-	-	-	0,1

* pour la culture de riz, les réductions des rendements et de la fertilisation sont extrapolées à partir des valeurs des autres céréales

Tableau A2-III. Données agronomiques utilisées pour la sous-action A2

Cultures		Surfaces fertilisées	N total (kg)	Réduction N (kg/ha ; %)	Q N concernées (kgN)	
Blé tendre	surfaces totales	4 922 954				
	surfaces fertilisées	98%	4 824 495	796 041 662	- 11 7%	740 644 495
	fertilisation actuelle kgN/ha	165				
	nb passages actuels / une saison	3,1				
Blé dur	surfaces totales	502 879				
	surfaces fertilisées	98%	492 821	86 736 570	- 7,3 4%	83 065 965
	fertilisation actuelle kgN/ha	176				
	nb épandages / culture	2,3				
Orge Printemps	surfaces totales	412 651				
	surfaces fertilisées	98%	1 541 320	200 371 535	- 7 6%	45 022 868
	fertilisation actuelle kgN/ha	116				
	nb épandages / culture	1,8				
Orge d'hiver	surfaces totales	1 128 669				
	surfaces fertilisées	98%	1 541 320	200 371 535	- 8 6%	139 427 434
	fertilisation actuelle kgN/ha	130				
	nb épandages / culture	2,5				
Colza	surfaces totales	1 458 973				
	surfaces fertilisées	98%	1 429 794	235 915 934	- 25 16%	198 898 097
	fertilisation actuelle kgN/ha	165				
	nb épandages / culture	2,5				

Annexes

Maïs grain	surfaces totales	1 598 400	1 534 464	239 376 384	- 4 3%	233 026 190
	surfaces fertilisées	96%				
	fertilisation actuelle kgN/ha	156				
	nb épandages / culture	1,6				
Maïs fourrage	surfaces totales	1 403 160	1 248 812	97 407 367	3%	94 485 146
	surfaces fertilisées	89%				
	fertilisation actuelle kgN/ha	78				
	nb épandages / culture	1,6				
Tournesol	surfaces totales	695 051	486 536	27 245 999	- 0 0	27 245 999
	surfaces fertilisées	70%				
	fertilisation actuelle kgN/ha	56				
	nb épandages / culture	0,9				
Pommes de terre	surfaces totales	154 638	153 092	24 341 568	- 36 23%	18 688 042
	surfaces fertilisées	99%				
	fertilisation actuelle kgN/ha	159				
	nb épandages / culture	2,2				
Betteraves	surfaces totales	382 775	363,636	39 272 715	- 5 5%	37 402 586
	surfaces fertilisées	95%				
	fertilisation actuelle kgN/ha	108				
	nb épandages / culture	1				
Riz	surfaces totales	22 521	22 521	3 378 150	- 5 5%	3 040 335
	surfaces fertilisées	100%				
	fertilisation actuelle kgN/ha	150				
	nb épandages / culture	3,0				

Tableau A2-IV. Calculs d'atténuation

(ces chiffres ne sont détaillés que pour la valeur centrale de l'estimation)

Calcul "Citepa"	total SANS	total AVEC	total différence	/ha SANS	/ha AVEC	/ha différence
Emission directe (kgCO ₂ e)	9 557 676 902	8 875 293 538	682 383 365	790	734	56
Emission indirecte via volatilisation	849 571 280	788 914 981	60 656 299	70	65	5
Emission indirecte via lixiviation	6 371 784 602	5 916 862 358	454 922 243	527	489	38
Emissions via réduction épandage	0	-12 299 673	12 299 673	0	-1	1
Total kgCO₂e	16 974 592 345	15 722 439 860	1 252 152 485	1403	1300	104
MgCO₂e	16 779 033	15 568 771	1 210 262	1,4	1,3	0,100
Emission amont via production fertilisants	9 260 274 587	8 599 124 666	661 149 921	765	711	55
Emission amont fuel	0	-2 574 244	2 574 244	0,0	-0,2	0,2
Emission amont pesticides	195 559 561	129 069 310	66 490 251	16	11	5
Total MgCO₂e amont induit	9 455 834	8 725 620	730 214	0,78	0,72	0,06
TOTAL			1 940 476			0,160

Calcul "expert"	total SANS	total AVEC	total différence	/ha SANS	/ha AVEC	/ha différence
Emission directe (kgCO ₂ e)	10 807 987 058	9 551 154 609	1 256 832 448	893	790	104
Emission indirecte via volatilisation	811 203 545	753 286 563	57 916 982	67	62	5
Emission indirecte via lixiviation	1 825 207 976	1 694 894 766	130 313 210	151	140	11
Emissions via réduction épandage	0	-12 299 673	12 299 673	0	0	1
Total kgCO₂e	13 444 398 579	11 987 036 265	1 457 362 314	1,111	992	120
MgCO₂e	13 444 399	11 987 036	1 457 362	1,1	1,0	0,120
Emission amont via production fertilisants	9 260 274 587	8 599 124 666	661 149 921	765	711	55
Emission amont fuel	0	-2 574 244	2 574 244	0,0	-0,21	0,21
Emission via pesticides	195 559 561	129 069 310	66 490 251	16	11	5
Total MgCO₂e amont induit	9 455 834	8 725 620	730 214	0,782	0,721	0,060
TOTAL			2 187 577			0,181

Annexe 3. Sous-action B : Améliorer la valorisation des produits organiques apportés

Les données et hypothèses utilisées proviennent :

- des statistiques de l'UNIFA 2010 concernant les tonnes d'azote apportées aux sols agricoles sous forme d'engrais minéral de synthèse, effluents d'élevage et autres produits organiques ;
- des données du RICA en ce qui concerne les quantités de fertilisants minéraux sur les parcelles ne recevant que des engrais minéraux, et la fertilisation moyenne sous forme minérale et organique à l'échelle France ;
- de divers rapports ADEME évaluant le potentiel de recyclage des produits organiques ;
- des chapitres 2 et 5 du rapport "Connaissances sur les flux d'azote et flux associés dans les élevages" de l'expertise scientifique collective menée par l'INRA (2009) ;
- du Chapitre 10: *Nitrogen flows in farming systems across Europe* par Jarvis et al., European Nitrogen Assessment (2010).

Les fourchettes hautes et basses données pour cette estimation sont générées, dans la première option (meilleure prise en compte de N organique dans le calcul du bilan) par les bornes inférieures et supérieures des valeurs de Keq utilisées par AzoFert® (N. Damay, communication personnelle, voir Tableau B-III), et dans la deuxième option (réduction des pertes par volatilisation) par les incertitudes sur la volatilisation d'ammoniac. Il n'y a pas d'incertitude calculée vis-à-vis de la troisième option (augmentation du volume de déchets recyclés), dont le poids relatif est moindre (ceci ne signifie pas qu'il n'y ait pas d'incertitude, par exemple sur les volumes supplémentaires disponibles).

Tableau B-I. Synthèse des données pour le calcul d'atténuation

Somme des surfaces concernées en France (ha)	12 074 969
Quantité totale d'N min apporté SANS (kgN)	1 746 709 734
Quantité totale d'N apporté AVEC option (1) (kgN)	1 668 658 884 (1 695 661 399 - 1 681 656 369)
Quantité totale d'N org concerné (1) (kgN)	424 394 848
Quantité totale d'N apporté AVEC option (2) (kgN)	1 658 316 555 (1 706 307 344 - 1 570 437 334)
Quantité totale d'N org concerné (2) (kgN)	424 394 848
Quantité totale d'N apporté AVEC option (3) (kgN)	1 719 487 734
Quantité totale d'N org concerné (3) (kgN)	27 222 000
Quantité totale d'N min apporté AVEC combiné (kgN)	1 573 043 706 (1 628 037 010 - 1 478 161 969)
Quantité totale d'N org concerné AVEC combiné	451 616 848
Réduction apport N combiné (kgN)	173 666 028 (118 672 724 - 268 547 765)
Réduction apport N combiné (kgN/ha)	14,4 (9,8 - 22,2)

Tableau B-II. Calculs d'atténuation

(ces chiffres ne sont détaillés que pour la valeur centrale de l'estimation)

Calcul "Citepa"	total SANS	total AVEC	total différence	/ha SANS	/ha AVEC	/ha différence
Emission directe (kgCO ₂ e)	9 563 890 809	8 613 004 182	950 886 627	792	713	79
Emission indirecte via volatilisation	850 123 627	765 600 372	84 523 256	70	63	7
Emission indirecte via lixiviation	6 375 927 206	5 742 002 788	633 924 418	528	476	52
Total kgCO₂e	16 789 941 642	15 120 607 342	1 669 334 300	1390	1252	138
MgCO₂e	16 789 942	15 120 342	1 669 334	1,39	1,25	0,14
Emission amont via production fertilisants	9 266 295 138	8 344 996 861	921 298 278	767	691	76
Total MgCO₂e amont induit	9 266 295	8 344 996	921 298	0,77	0,69	0,08
TOTAL			2 590 633			0,215

Calcul "expert"	total SANS	total AVEC	total différence	/ha SANS	/ha AVEC	/ha différence
Emission directe (kgCO ₂ e)	13 455 340 041	11 809 683 881	1 645 656 161	1114	978	136
Emission indirecte via volatilisation	1 206 180 495	1 150 775 635	55 404 861	100	95	5
Emission indirecte via lixiviation	1 826 394 632	1 644 805 960	181 588 672	151	136	15
Total kgCO₂e	16 487 915 169	14 605 265 475	1 882 649 693	1365	1210	156
MgCO₂e	16 487 915	14 605 265	1 882 649	1,37	1,21	0,156
Emission amont via production fertilisants	9 266 295 138	8 344 996 861	921 298 277	767	691	76
Total MgCO₂e amont induit	9 266 295	8 344 996	921 298	0,77	0,69	0,078
TOTAL			2 803 948			0,232

Tableau B-III. Substitution permise par la meilleure prise en compte des effluents apportés

Effluents épandus	Non pris en compte (33%) (kgN)	Apport sur culture de printemps	
		Keq	eq N min (kgN)
Total : 424 394 848 kgN	140 050 300		
Lisiers (47% du total)	65 823 641	0,65 (0,55 - 0,65)	42 785 367 (36 203 003 - 42 785 367)
Fumiers (53% du total)	74 226 659	0,25 (0,20 - 0,30)	18 556 665 (14 845 332 - 22 267 998)
Total			61 342 031 (51 048 334 - 65 053 364)

Tableau B-IV. Estimation de la volatilisation aux dépens des effluents d'élevage

Comparaison des quantités volatilisées forfaitairement (20% CITEPA) et fourchettes basse et haute tenant compte de l'importance de la fraction ammoniacale, et de la proportion volatilisée (Rapport Effluents d'élevage, INRA)

	Azote des effluents (kgN)	Pertes forfaitaires (20%) (kgN)	% N ammoniacal	Pertes calculées / fraction ammoniacale (kgN)	
				Valeur basse N ammo. = 5% Pertes = 40%	Valeur haute N ammo. = 25% Pertes = 90%
Fumiers	224 929 270	44 985 854	5-25	4 498 585	50 609 086
Lisiers	199 465 579	39 893 116	45-70	35 903 804	125 663 315
Total	424 394 848	84 878 970		40 402 390	176 272 400
Moyenne				108 337 395	

Annexes

Tableau B-V. Données agronomiques utilisées pour les calculs

Cultures		Surfaces fertilisées (ha)	Total N (kg)	% surface fertilisation uniquement minérale	N-org (kgN/ha)	N-min (kgN/ha)	N fert org / % total N	N-org France (kgN)	N non pris en compte (33% total N)	
Blé tendre	surfaces totales	4 922 954	4 824 495	796 041 662	91	12	150	7	57 893 939	19 105 000
	surfaces fertilisées	98%								
	fertilisation actuelle kgN/ha	165								
	nb passages actuels / une saison	3,1								
Blé dur	surfaces totales	502 879	492 821	86 736 570	96	3	151	2	1 478 464	487 893
	surfaces fertilisées	98%								
	fertilisation actuelle kgN/ha	176								
	nb épandages / culture	2,3								
Orge et escourgeon	surfaces totales	1 572 775	1 541 320	200 371 535	89	16	117	12	24 661 112	8 138 167
	surfaces fertilisées	98%								
	fertilisation actuelle kgN/ha	130								
	nb épandages / culture	2,5								
Colza	surfaces totales	1 458 973	1 429 794	235 915 934	80	14	159	8	20 017 110	6 605 646
	surfaces fertilisées	98%								
	fertilisation actuelle kgN/ha	165								
	nb épandages / culture	2,5								
Maïs grain	surfaces totales	1 598 400	1 534 464	239 376 384	66	58	138	30	88 998 912	29 369 641
	surfaces fertilisées	96%								
	fertilisation actuelle kgN/ha	156								
	nb épandages / culture	1,6								
Maïs fourrage	surfaces totales	1 403 160	1 248 812	97 407 367	68	149	67	69	186 073 048	61 404 106
	surfaces fertilisées	89%								
	fertilisation actuelle kgN/ha	78								
	nb épandages / culture	1,6								
Tournesol	surfaces totales	695 051	486 536	27 245 999	66	18	40	31	8 757 643	2 890 022
	surfaces fertilisées	70%								
	fertilisation actuelle kgN/ha	56								
	nb épandages / culture	0,9								
Pommes de terre	surfaces totales	154 638	153 092	24 341 568	54	115	154	43	17 605 536	5 809 827
	surfaces fertilisées	99%								
	fertilisation actuelle kgN/ha	159								
	nb épandages / culture	2,2								
Betteraves	surfaces totales	382 775	363 636	39 272 715	48	52	107	33	18 909 085	6 239 998
	surfaces fertilisées	95%								
	fertilisation actuelle kgN/ha	108								
	nb épandages / culture	1								

Annexe 4. Sous-action C1 : Ajuster les dates d'apport aux besoins des cultures

Les calculs sont effectués à partir des données SAA 2010 pour les surfaces cultivées à l'échelle France, RICA 2010 pour les rendements, et de l'enquête "Pratiques culturales" 2006 pour le pourcentage de surfaces fertilisées ainsi que la dose moyenne d'azote minéral apportée par hectare. Pour estimer une proportion de situations avec des reliquats sortie hiver >50 kgN/ha, nous avons utilisé les données du laboratoire LDAR de l'Aisne, sur les années 2005 à 2012. La cinétique des besoins des cultures et les besoins en azote en début de cycle sont celles fournies par le COMIFER (<http://www.comifer.asso.fr/index.php/bilan-azote/fiches-cultures.html>). La valeur seuil de 50 kgN/ha a été choisie. Les situations où le reliquat sortie hiver est >50 kgN/ha sont les situations pour lesquelles le premier apport pourrait être supprimé et la dose d'azote reportée au moment du second apport. Le report de 50 kgN sur un apport plus tardif conduit à économiser 15 kgN /ha en raison de l'amélioration de l'efficacité de recouvrement, dans ces situations. Cette réduction a été appliquée à toute la sole France de ces cultures en tenant compte de la proportion de parcelles concernées.

L'assiette maximale technique constituée du blé d'hiver, de l'orge d'hiver et du colza représente 7,8 Mha, dont 1,8 Mha sont concernés par la mesure avec les valeurs moyenne de reliquats sortie hiver provenant du département de l'Aisne. Cette assiette dépend donc du pourcentage de surfaces ayant un fort reliquat à la sortie de l'hiver, et ce pourcentage peut varier et évoluer au cours des années, notamment en fonction de la gestion des intercultures (voir Action 4, cultures intermédiaires pièges à nitrates). Nous avons donc fait porter l'incertitude sur les surfaces concernées chaque année, et non sur le potentiel d'atténuation unitaire pour cette sous-action. La fourchette de valeurs hautes et basses pour cette sous-action est constituée par la proportion de surfaces des années à fort reliquat sortie d'hiver (AMT = 3 Mha) et des années à faible reliquat (AMT = 0,53 Mha), à partir des statistiques provenant du département de l'Aisne.

Tableau C1-I. Reliquats d'azote minéral mesurés sur blé, orge et colza d'hiver
Données fournies par le Laboratoire d'Analyse et de Recherche départemental de l'Aisne (2005-2012)

Année	Blé				Orge				Colza			
	Nb parcelles	Rsh kgN/ha	nb parcelles > 50 kgN/ha	% parcelles > 50 kgN/ha	Nb parcelles	Rsh kg N/ha	nb parcelles > 50 kgN/ha	% parcelles > 50 kgN/ha	Nb parcelles	Rsh kgN/ha	nb parcelles > 50 kgN/ha	% parcelles > 50 kgN/ha
2005	1193	55	606	51%	108	37	19	18%	32	25	0	0%
2006	1301	62	868	67%	49	42	17	35%	59	23	0	0%
2007	1243	50	558	45%	56	36	6	11%	73	23	0	0%
2008	1372	48	681	50%	119	36	0	0%	81	33	6	7%
2009	1149	42	158	14%	102	34	6	6%	39	22	0	0%
2010	1174	41	133	11%	79	33	0	0%	40	26	0	0%
2011	1189	37	37	3%	63	31	0	0%	40	27	0	0%
2012	858	39	114	13%	50	35	0	0%	30	20	0	0%
Total // Moyenne	9479	47	-	32%	626	35	-	9%	394	25	-	0,9%

Tableau C1-II. Données agronomiques utilisées

Cultures			Surfaces fertilisées	N total (kgN)	Surfaces concernées (% et ha)	Q N concernées (kgN)
Blé tendre d'hiver	surfaces totales	4 880 238	4 782 633	789 134 485	32% 1 530 443	22 956 640
	surfaces fertilisées	98%				
	fertilisation actuelle kgN/ha	165				
	nb passages actuels / une saison	3,1				
Blé dur d'hiver	surfaces totales	490 140	480 337	84 539 347	32% 153 708	2 305 619
	surfaces fertilisées	98%				
	fertilisation actuelle kgN/ha	176				
	nb épandages / culture	2,3				
Orge d'hiver	surfaces totales	1 151 703	1 128 669	146 726 962	9% 101 580	1 523 703
	surfaces fertilisées	98%				
	fertilisation actuelle kgN/ha	130				
	nb épandages / culture	2,5				
Colza d'hiver	surfaces totales	1 458 973	1 429 794	235 915 934	1% 14 298	214 469
	surfaces fertilisées	98%				
	fertilisation actuelle kgN/ha	165				
	nb épandages / culture	2,5				

Annexes

Tableau C1-III. Synthèse des données pour le calcul d'atténuation

Somme des surfaces concernées en France (ha)	7 821 433
Somme des surfaces concernées par la mesure (ha)	1 800 029 (537 584 - 2 998 557)
Quantité totale d'N apporté SANS (kgN)	295 140 212 (88 834 653 - 491 241 763)
Quantité totale d'N apporté AVEC (kgN)	268 139 782 (80 770 897 - 446 263 405)
Réduction moyenne passage d'épandeur	1
Réduction fuel	2 160 034 (645 100 - 3 598 269)
Réduction apport N (kgN)	27 000 430 (8 063 756 - 44 978 359)
Réduction apport N (kgN/ha)	15,0

Tableau C1-IV. Calculs d'atténuation

(ces chiffres ne sont détaillés que pour la valeur centrale de l'estimation)

Calcul "Citepa"	total SANS	total AVEC	total différence	/ha SANS	/ha AVEC	/ha différence
Emission directe (kgCO ₂ e)	1 616 003 339	1 468 165 858	147 837 481	898	816	82
Emission indirecte via lixiviation	1 077 335 559	978 777 239	98 558 320	599	544	55
Emission indirecte via volatilisation	143 644 741	130 503 632	13 141 109	80	73	7
Emission via réduction épandage	0	-5 810 493	5 810 493	0,0	-3,2	3
Total kgCO₂e	2 836 983 639	2 571 636 236	265 347 403	1 576	1 429	147,4
MgCO₂e	2 836 984	2 571 636	265 347	1,54	1,51	0,147
Emission amont via production fertilisants	1 565 718 825	1 422 481 543	143 237 282	870	790	80
Emission amont fuel		-1 216 099	1 216 099	0,0	-0,7	0,7
Total MgCO₂e amont induit		6 520 307	144 453			0,080
TOTAL			409 801			0,228

Calcul "expert"	total SANS	total AVEC	total différence	/ha SANS	/ha AVEC	/ha différence
Emission directe (kgCO ₂ e)	2 036 336 377	1 700 891 116	335 445 261	1 131	945	186
Emission indirecte via lixiviation	308 604 509	252 335 087	56 269 422	171	140	31
Emission indirecte via volatilisation	137 157 559	124 609 919	12 547 640	80	69	11
Emission via réduction épandage	0	-5 810 493	5 810 493	0,0	-3,2	3
Total kgCO₂e	2 482 098 445	2 072 025 630	410 072 815	1 383	1 151	231
MgCO₂e	2 482 098	2 072 026	410 073	1,383	1,151	0,231
Emission amont via production fertilisants	1 565 718 825	1 422 481 543	143 237 282	870	790	80
Emission amont fuel		-1 216 099	1 216 099	0,0	-0,7	0,7
Total MgCO₂e amont induit		1 421 265 444	144 453			0,080
TOTAL			554 526			0,312

Annexe 5. Sous-action C2 : Adapter les formes d'azote minéral apportées

Les calculs sont effectués à partir des données SAA 2010 pour les surfaces cultivées à l'échelle France, RICA 2010 pour les rendements, et de l'enquête "Pratiques culturales" 2006 pour le pourcentage de surfaces fertilisées ainsi que la dose moyenne d'azote minéral apportée par hectare. Pour estimer l'option technique "usage d'un inhibiteur de nitrification", le modèle utilisé est le produit commercialisé sous le nom d'ENTEC® par la firme *EuroChem*. Les données sont issues des publications scientifiques (voir section bibliographie), ainsi que les documents techniques agronomiques disponibles.

L'assiette maximale technique a été calculée comme étant constituée de toutes les grandes cultures susceptibles de recevoir de l'engrais, en considérant les surfaces, la proportion de surface fertilisée, et la quantité d'azote qui pourrait être appliquée avec inhibiteur par culture et par an (à l'aide des fiches agronomiques ENTEC® d'Eurochem)¹. Ceci consiste à exclure le dernier apport d'azote de l'association avec l'inhibiteur, car on attend de cet apport, en général, une mise à disposition très rapide de l'azote pour assurer des besoins instantanés de la culture, importants. Ces valeurs pour le dernier apport ont été estimées à partir des fiches "cultures" du COMIFER (<http://www.comifer.asso.fr/index.php/bilan-azote/fiches-cultures.html>). On calcule alors une quantité d'azote minéral concernée par culture, d'où on déduit une quantité totale d'azote concerné par culture et pour l'ATM concernée. L'apport de l'inhibiteur conduit à supprimer en moyenne un épandage, sauf pour le blé dur (0,5 épandage en moyenne). La réduction de la dose d'azote permise par l'accroissement de la fertilisation est estimée à 10% de la dose totale.

Nous avons considéré qu'il était nécessaire de tenir compte de problèmes potentiels d'innocuité (écotoxicité pour les sols) et avons limité l'usage de l'inhibiteur à 20% de l'AMT, ce qui peut signifier de l'apporter une année sur cinq sur le même sol, ou de réduire son utilisation à un cinquième de la dose maximale. Cette valeur moyenne est encadrée par deux valeurs reflétant les incertitudes associées à l'adoption des inhibiteurs de nitrification : la valeur basse obtenue avec 10% du potentiel agronomique d'utilisation de l'inhibiteur, et la valeur haute obtenue avec 25% de ce potentiel agronomique.

Tableau C2-I. Données agronomiques utilisées

Cultures			surfaces fertilisées (ha)	Total N (kgN)	Dose N exclue apport inhibiteur	Dose N avec inhibiteur	Réduction moyenne épandage	Total N concerné (kgN)
Blé tendre	surfaces totales	4 922 954	4 824 495	796 041 662	40	125	-1	603 061 865
	surfaces fertilisées	98%						
	fertilisation actuelle kgN/ha	165						
	nb passages actuels / une saison	3,1						
Blé dur	surfaces totales	502 879	492 821	86 736 570	76	100	-0,5	49 282 142
	surfaces fertilisées	98%						
	fertilisation actuelle kgN/ha	176						
	nb épandages / culture	2,3						
Orge et escourgeon	surfaces totales	1 572 775	1 541 320	200 371 535	40	90	-1	138 718 755
	surfaces fertilisées	98%						
	fertilisation actuelle kgN/ha	130						
	nb épandages / culture	2,5						
Colza	surfaces totales	1 458 973	1 429 794	235 915 934	60	105	-1	150 128 322
	surfaces fertilisées	98%						
	fertilisation actuelle kgN/ha	165						
	nb épandages / culture	2,5						
Maïs grain	surfaces totales	1 598 400	1 534 464	239 376 384	80	76	-1	116 619 264
	surfaces fertilisées	96%						
	fertilisation actuelle kgN/ha	156						
	nb épandages / culture	1,6						
Maïs fourrage	surfaces totales	1 403 160	1 248 812	97 407 367	30	48	-1	59 942 995
	surfaces fertilisées	89%						
	fertilisation actuelle kgN/ha	78						
	nb épandages / culture	1,6						
Pommes de terre	surfaces totales	154 638	153 092	24 341 568	0	159	-1	24 341 568
	surfaces fertilisées	99%						
	fertilisation actuelle kgN/ha	159						
	nb épandages / culture	2,2						
Betteraves	surfaces totales	382 775	363 636	39 272 715	0	108	0	39 272 715
	surfaces fertilisées	95%						
	fertilisation actuelle kgN/ha	108						
	nb épandages / culture	1						

¹ Les valeurs retenues à partir de ces fiches n'engagent que les auteurs de cette action.

Tableau C2-II. Synthèse des données pour le calcul d'atténuation

Somme des surfaces concernées en France (ha)	11 588 434
Somme des surfaces concernées par la mesure (ha)	2 317 687 (1 158 843 - 2 897 108)
Quantité totale d'N apporté SANS (kgN)	343 892 747 (171 946 373 - 429 865 734)
Quantité totale d'N apporté AVEC (kgN)	320 265 394 (160 132 697 - 400 331 743)
Quantité totale d'N concernée par l'inhibiteur (kgN)	236 273 525 (118 136 763 - 295 341 906)
Réduction moyenne passage d'épandeur	0,95
Réduction fuel	2 634 813 (1 317 406 - 3 293 516)
Réduction apport N (kgN)	23 627 353 (11 813 676 - 29 534 191)
Réduction apport N (kgN/ha)	10,2

Tableau C2-III. Calculs d'atténuation

(ces chiffres ne sont détaillés que pour la valeur centrale de l'estimation)

Calcul "Citepa"	total SANS	total AVEC	total différence	/ha SANS	/ha AVEC	/ha différence
Emission directe (kgCO ₂ e)	1 882 941 749	1 753 573 134	129 368 615	812	757	56
Emission indirecte via volatilisation	167 372 600	155 873 167	11 499 432	72	67	5
Emission indirecte via lixiviation	1 255 294 499	1 169 048 756	86 245 743	542	504	37
Emission via réduction épandage	-	-7 087 646	7 087 646	-	-3	3
Total kgCO₂e	3 305 608 849	3 071 407 411	234 201 438	1426	1325	101
MgCO₂e	3 305 609	3 071 407	234 201	1,43	1,33	0,101
Emission amont via production fertilisants	1 824 351 022	1 699 007 917	125 343 105	787	733	54
Emission amont fuel	-	-1 480 765	1 480 765	-	-0,6	1
Total MgCO₂e amont induit	-	-	126 824	-	732	0,055
TOTAL			361 025			0,156

Calcul "expert"	total SANS	total AVEC	total différence	/ha SANS	/ha AVEC	/ha différence
Emission directe (kgCO ₂ e)	2 174 677 071	1 635 631 272	539 045 798	938	706	233
Emission indirecte via volatilisation	159 813 837	148 833 734	10 980 103	69	64	5
Emission indirecte via lixiviation	359 581 134	309 760 209	49 820 925	155	134	21
Emission via réduction épandage	-	-7 087 646	7 087 646	-	-3	3
Total kgCO₂e	2 694 072 042	2 087 137 569	606 934 473	1 162	901	262
MgCO₂e	2 694 072	2 087 138	606 934	1,16	0,90	0,262
Emission amont via production fertilisants	1 824 351 022	1 699 007 917	125 343 105	787	733	54
Emission amont fuel	-	-1 480 765	1 480 765	-	-0,6	1
Total MgCO₂e amont induit	-	-	126 824	-	732	0,055
TOTAL			733,758			0,317

Le calcul à l'échelle France, des réductions de la dose totale d'azote minéral apportée aux grandes cultures par la substitution de l'ammonitrate à l'urée et à la solution azotée est calculée. Les données sur l'usage des engrais sont issues de l'UNIFA (2010).

Les agriculteurs apportent généralement plus d'azote pour pallier le risque de volatilisation (10-15% sur céréales et 10 à 20% sur colza, par exemple). Ces données sont issues d'études (par exemple : Sylvester-Bradley et al., 2012 ; Cohan et Le Souder, 2013). On retient l'hypothèse moyenne d'une augmentation de 15% de la dose totale en cas d'apport d'urée ou de solution azotée. On calcule, sur l'assiette de cette sous-action, les quantités d'azote concernées (sous formes urée et solution azotée) en faisant l'hypothèse que la répartition des différentes formes d'engrais azoté à l'échelle France est similaire à celle sur les grandes cultures. On calcule la diminution moyenne de la dose d'azote par hectare, en considérant une réduction possible de 15% de l'azote (cette estimation globale ne distingue pas les types de sol sur lesquels sont épandues ces formes d'engrais, et prend donc un chiffre moyen toutes situations confondues).

Annexes

Tableau C2-IV. Réduction de la fertilisation minérale permise par le changement de formes d'azote :
substitution de l'urée et de la solution azotée par les ammonitrates

Total N engrais minéraux 2010 France (kgN)		2 332 000 000
Total N sur l'assiette (ha) concernée par l'action (kgN)		1 719 463 734
Formes d'azote apportées France (2010)	% total N apporté	Quantités N apportées (MgN)
Urée	16,9%	393 430
Ammonitrate	40,5%	944 576
Solution azotée	29,7%	692 955
Autres simples	2,9%	67 962
Composés	10,0%	232 879
Substitution	Q concernées	Réduction N (15% total)
Assiette concernée (ha)	11 588 434	
Urée (kgN)	290 114 091	43 517 114
Solution azotée (kgN)	510 982 919	76 647 438
Réduction totale azote (kgN)		120 164 551
Réduction azote (kgN/ha)		10,3

Annexe 6. Sous-action C3 : Enfouir de manière localisée les engrais minéraux dans les sols

Cette option technique est applicable aux engrais minéraux apportés sous forme solide, sur le rang ou au contraire dans les inter-rangs au moment du semis des cultures. Il s'agit donc de situations où l'intérêt d'apporter de l'engrais au semis est avéré, valable sur les cultures de printemps et notamment celles qui ont des besoins importants en début de cycle : blé de printemps, orge de printemps, pommes de terre, betteraves, maïs.

Les calculs sont effectués à partir des données SAA 2010 pour les surfaces cultivées à l'échelle France, RICA 2010 pour les rendements, et de l'enquête "Pratiques culturales" 2006 pour le pourcentage de surfaces fertilisées ainsi que la dose moyenne d'azote minéral apportée par hectare. Une réduction de la fertilisation minérale représentant 10% de la fertilisation minérale totale a été considérée possible avec cette technique, la fourchette basse étant obtenue en considérant qu'il n'y a pas de réduction de la fertilisation (0%) et la fourchette haute étant obtenue avec une réduction de 15% de la dose totale, ce qui reflète les différences de réponse obtenues dans les essais agronomiques.

Tableau C3-I. Données agronomiques utilisées

Cultures			Surfaces fertilisées (ha)	Total N (kg)	Fertilisation après 15% réduction	Total N concerné (kgN)
Blé tendre printemps	surfaces totales	42 716	41 862	6 907 177	140	5 871 101
	surfaces fertilisées	98%				
	fertilisation actuelle kgN/ha	165				
	nb passages actuels / une saison	3,1				
Blé dur printemps	surfaces totales	12 739	12 484	2 197 223	150	49 282 142
	surfaces fertilisées	98%				
	fertilisation actuelle kgN/ha	176				
	nb épandages / culture	2,3				
Orge et escourgeon printemps	surfaces totales	421 072	412 651	53 644 573	111	45 597 887
	surfaces fertilisées	98%				
	fertilisation actuelle kgN/ha	130				
	nb épandages / culture	2,5				
Maïs grain	surfaces totales	1 598 400	1 534 464	239 376 384	133	203 469 926
	surfaces fertilisées	96%				
	fertilisation actuelle kgN/ha	156				
	nb épandages / culture	1,6				
Maïs fourrage	surfaces totales	1 403 160	1 248 812	97 407 367	66	82 796 262
	surfaces fertilisées	89%				
	fertilisation actuelle kgN/ha	78				
	nb épandages / culture	1,6				
Pommes de terre	surfaces totales	154 638	153 092	24 341 568	135	20 690 332
	surfaces fertilisées	99%				
	fertilisation actuelle kgN/ha	159				
	nb épandages / culture	2,2				
Betteraves	surfaces totales	382 775	363 636	39 272 715	92	33 381 808
	surfaces fertilisées	95%				
	fertilisation actuelle kgN/ha	108				
	nb épandages / culture	1				

Tableau C3-II. Synthèse des données pour le calcul d'atténuation

Somme des surfaces concernées en France (ha)	3 767 001
Quantité totale d'N apporté SANS (kgN)	463 147 007
Quantité totale d'N apporté AVEC (kgN)	416 832 306 (463 147 007 - 393 674 956)
Réduction apport N (kgN)	46 314 701 (0 - 69 472 051)
Réduction apport N (kgN/ha)	12,3 (0 - 18,4)

Annexes

Tableau C3-III. Calculs d'atténuation

(ces chiffres ne sont détaillés que pour la valeur centrale de l'estimation)

Calcul "Citepa"	total SANS	total AVEC	total différence	/ha SANS	/ha AVEC	/ha différence
Emission directe (kgCO ₂ e)	2 535 903 541	2 282 313 187	253 590 354	673	606	67
Emission indirecte via volatilisation	225 413 648	202 872 283	22 541 365	60	54	6
Emission indirecte via lixiviation	484 275 773	435 848 196	48 427 577	129	116	13
Total kgCO₂e	3 245 592 962	2 921 033 666	324 559 296	862	775	86
MgCO₂e	3 245 593	2 291 033	324 559	0,86	0,78	0,086
Emission amont via production fertilisants	2 456 994 869	2 211 295 383	245 699 487	652.2	587.0	65.2
Total MgCO₂e amont induit	2 456 995	2 211 295	245 699	0,65	0,59	0,065
TOTAL			570 259			0,151

Calcul "expert"	total SANS	total AVEC	total différence	/ha SANS	/ha AVEC	/ha différence
Emission directe (kgCO ₂ e)	2 605 020 375	2 157 780 891	447 239 484	692	573	119
Emission indirecte via volatilisation	215 233 677	129 140 206	86 093 471	57	34	23
Emission indirecte via lixiviation	484 275 773	435 848 196	48 427 577	129	116	13
Total kgCO₂e	3 304 529 825	2 722 769 293	581 760 532	877	723	154
MgCO₂e	3 304 530	2 722 769	581 761	0,87	0,72	0,154
Emission amont via production fertilisants	2 456 994 869	2 211 295 383	245 699 487	652	587	65
Total MgCO₂e amont induit	2 456 995	2 211 295	245 699	0,65	0,58	0,065
TOTAL			827 460			0,220

Annexe 7. Analyse de variance obtenue lors de l'ajustement de la fonction reliant les émissions de N₂O à l'azote minéral apporté au sol

	DDL	Somme des carrés	Carré moyen	Fc	p-value
Source				25,21	0,01
Modèle	1	191,664	191,664		
Résidu	23	174,827	7,601		
Total	24	366,491			

Annexe 8. Coûts utilisés dans les calculs de coûts unitaires des sous-actions

Tableau I. Charges de référence liées aux produits phytosanitaires

Culture	€/ ha
Blé tendre	159
Blé dur	175
Orge printemps	109
Orge hiver	179
Colza	246
Maïs grain	99
Maïs fourrage	99
Tournesol	86
Pommes de terre	576
Betteraves	188
Riz	47

Tableau II. Charges de référence liées au passage pour l'épandage des fertilisants

Intervention culturale	Matériel	€/ ha / passage
Epandage ("N2A" et "date d'apport")	Tracteur : 90 cv 4 roues motrices (500 heures/an)	9,07
	Pulvérisateur traîné : 5200l 36M DPAE (1400 ha/an)	
Epandage ("Inhibiteur")	Tracteur : 90 cv 4 roues motrices (500 heures/an)	6,43
	Epandeur d'engrais : Cuve 25 hl, largeur épandage 36 m (400 ha/an)	
	Benne pour le ravitaillement : 12 à 14 tonnes	