HAL
open science

8.8. Fourniture d'azote minéral (N) aux plantes cultivées

Isabelle Cousin, Olivier Therond

▶ **To cite this version:**

Isabelle Cousin, Olivier Therond. 8.8. Fourniture d'azote minéral (N) aux plantes cultivées. 2017. hal-02785493

HAL Id: hal-02785493

https://hal.inrae.fr/hal-02785493

Submitted on 4 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

8.8. Fourniture d'azote (N) minéral aux plantes cultivées

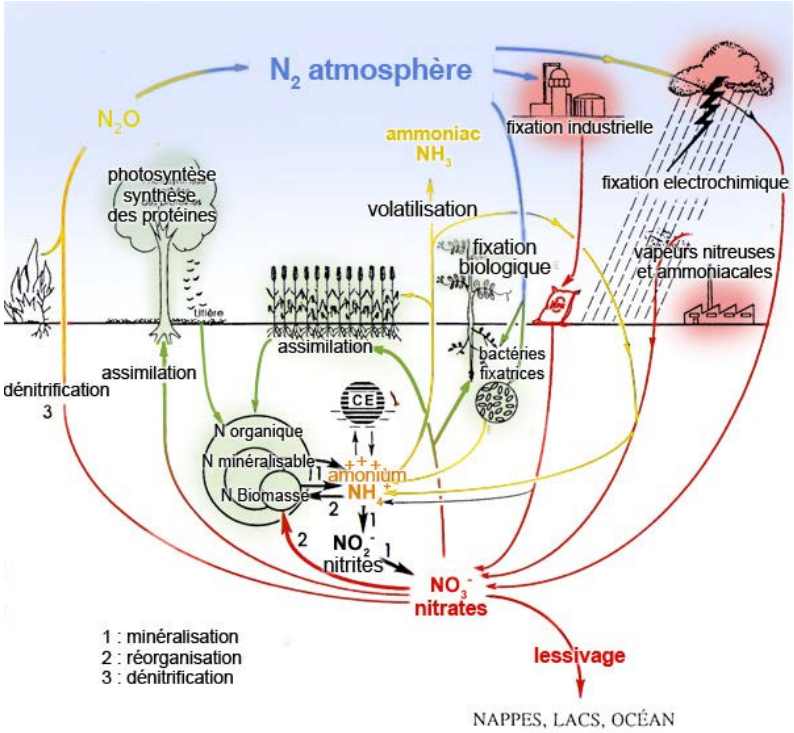
8.8.1. Spécification biophysique

Expert coordinateur : Isabelle Cousin
Contributeur scientifique : Olivier Therond

L'azote est l'élément le plus abondant dans l'atmosphère, l'hydrosphère et la biosphère (Figure 8-8-1), mais, parmi les éléments nécessaires à la vie, c'est le moins accessible aux êtres vivants, puisque 99% de l'azote présent sur terre est indisponible pour 99 % des êtres vivants (Galloway *et al.*, 2004). En effet, l'azote est présent principalement sous forme de diazote, dit « azote non réactif », alors que ce sont les autres composés azotés dits « réactifs » qui sous-tendent la vie. La conversion naturelle de diazote en azote réactif est réalisée (i) dans le sol par le processus de fixation biologique naturelle (BNF) par des microorganismes capables de capter l'azote de l'air, et (ii) dans l'atmosphère par des réactions chimiques créant des formes oxydées de l'azote lors des orages (Billen *et al.*, 2013). Cependant, ce sont les activités humaines qui sont à l'origine de la production de la plus grande quantité d'azote réactif, et, à l'exception notable de la combustion des énergies fossiles, les activités liées à la production agricole : d'une part, la culture de légumineuses associées à des bactéries symbiotiques capables de fixer le diazote atmosphérique a permis d'augmenter la production végétale pour la consommation humaine depuis le néolithique ; d'autre part, la mise au point, au début du XXème siècle, du procédé de Haber-Bosch permettant la fabrication d'ammonium à partir de diazote et dihydrogène, a ouvert l'ère de la fertilisation minérale (Galloway *et al.*, 2003; Galloway *et al.*, 2004). On considère ainsi aujourd'hui que 40 % de la population mondiale vit d'une production agricole liée à l'utilisation d'engrais azotés minéraux, et que la création d'azote réactif a doublé depuis les années 70, bien que la fixation biologique naturelle ait diminué du fait du changement d'occupation des sols (Galloway *et al.*, 2003; Galloway *et al.*, 2004). L'azote réactif circule sous différentes formes d'un compartiment de l'environnement à un autre, ce que l'on décrit comme la cascade de l'azote : l'azote lixivié sous forme nitrate est à l'origine d'une acidification des eaux entrainant une eutrophisation des eaux en présence de concentration en phosphore (ions PO_4) en quantité suffisante, et une diminution de la biodiversité ; l'azote émis dans l'atmosphère sous forme de protoxyde d'azote et de NOx contribue à l'augmentation de l'effet de serre et à la diminution de l'ozone stratosphérique ; l'azote émis sous forme NH_3 contribue à l'eutrophisation des milieux aquatiques, à l'acidification des sols et des eaux et favorise les pluies acides.

La majeure partie de l'azote réactif d'origine anthropique [75%] est utilisée dans les agroécosystèmes pour la production agricole. Des expérimentations de longue durée montrent en effet que les rendements agricoles sont multipliés par 2 ou 3 lorsque l'on ajoute des fertilisants (Spiertz, 2010). Les fertilisants d'origine minérale restent la principale source de nutriments appliqués au sol pour la production végétale, même si la fertilisation d'origine organique est non négligeable (Spiertz, 2010) : en 40 ans, la quantité de fertilisants minéraux a été multipliée par 7,4 alors que, dans le même temps, les rendements étaient multipliés seulement par 2,4, car l'efficience d'utilisation de l'azote est d'autant plus élevée que le niveau de fertilisation est bas (Hirel *et al.*, 2011). De plus, en moyenne, la moitié seulement de l'azote apporté aux cultures est réellement utilisée et exportée par les plantes, le reste étant fixé par le sol [5%], émis dans l'atmosphère [25%] ou lixivié vers le système aquatique [20 %] (Galloway *et al.*, 2004; Drinkwater and Snapp, 2007). On note enfin que l'efficience d'utilisation de l'azote semble supérieure dans les systèmes agricoles favorisant l'utilisation de fertilisants d'origine organique (Lassaletta *et al.*, 2014). Bien que les stratégies actuelles de fertilisation - fractionnement des apports pour une meilleure adéquation temporelle entre les apports de fertilisants et les besoins réels de la plante (Spiertz, 2010), utilisation de cultures intermédiaires pièges à nitrate (Justes *et al.*, 2009), modification et allongement des rotations – associées à des progrès génétiques permettant une meilleure efficience d'utilisation de l'azote par les plantes (Spiertz, 2010; Hirel *et al.*, 2011) aient contribué à limiter les pertes d'azote dans l'environnement, les surplus azotés liés à l'activité agricole restent élevés (Billen *et al.*, 2013). L'enjeu est donc de limiter le recours à la fertilisation azotée d'origine minérale, et d'évaluer la capacité des agrosystèmes à fournir aux plantes une quantité d'azote disponible suffisante pour leur croissance végétale (Drinkwater and Snapp, 2007), tout en limitant la circulation d'azote à l'origine de nuisances environnementales.

Figure 8-8-1. Le cycle de l'azote, d'après Mariotti (1996)



8.8.1.1. Dénomination précise et nature du SE

Etant donné l'omniprésence de l'élément azote sous différentes formes dans l'écosystème, de nombreux auteurs introduisent un service, souvent classé parmi les services de régulation, qui concerne cet élément. Ce service prend différentes dénominations, et correspond à différents processus de l'écosystème. On peut classer les services liés à l'azote en trois grandes catégories, selon i) qu'ils concernent le cycle de l'azote dans son ensemble, ii) qu'ils sont plutôt en lien avec la fourniture d'azote nécessaire à la croissance des plantes, ou iii) qu'ils sont plutôt en lien avec la perte d'azote par l'écosystème (et donc en lien avec les processus de lixiviation ou d'émission gazeuse). On recense ainsi les 'services écosystémiques'[1] suivants dans la littérature :

- Certains auteurs proposent un service très général « Cycle de l'azote » (*nitrogen cycling* ou, plus généralement parfois *nutrient cycling*), cité par exemple par (Andrews *et al.*, 2004; Barrios, 2007; Zhang *et al.*, 2007; Kibblewhite *et al.*, 2008; Sandhu *et al.*, 2008; Robinson *et al.*, 2009; Bennett *et al.*, 2010; Banwart *et al.*, 2011; Rutgers *et al.*, 2012; Hails and Ormerod, 2013; Smith *et al.*, 2013; Williams and Hedlund, 2013; Cong *et al.*, 2014). Malgré une dénomination commune, le service décrit sous le vocable « *nutrient cycling* » correspond à des conceptualisations très différentes. Par exemple, pour (Williams and Hedlund (2013), 2014)), le service décrit l'ensemble du cycle de l'azote dans le sol, alors que, pour Schulte *et al.* (2014), il décrit la capacité du sol à stocker et relarguer des nutriments provenant d'apports exogènes (boues, effluents d'élevage). On note également que ce service est souvent présenté de façon assez théorique, sans réelle proposition de son évaluation biophysique. On pourrait cependant considérer des cas d'étude sur des surfaces très restreintes où l'ensemble des processus du cycle de l'azote pourraient être évalués, ce qui permettrait ainsi de proposer un service général « cycle de l'azote ». De façon plus simplifiée, (Smaling and Dixon, 2006; Hails and Ormerod, 2013) proposent un service « Stock d'azote » (*nitrogen stock*) qui représente la quantité totale d'azote présente dans le sol, sans que l'on préjuge de son utilisation ou de son devenir.

- D'autres auteurs proposent un service qui permet une évaluation de l'azote qui serait disponible pour la croissance végétale. D'après Galloway *et al.* (2003), moins de 5 % de l'azote présent dans le sol serait disponible pour la croissance végétale et Sandhu *et al.* (2008) proposent ainsi une valeur de 2% de la quantité d'azote total

[1] Le terme 'service' est ici employé dans l'acception que les auteurs lui donnent, et qui ne correspond pas forcément à l'acception de l'étude EFESE-écosystèmes agricoles.

dans le sol pour qualifier la quantité d'azote disponible pour la plante. De façon plus spécifique, Fu *et al.* (2013) ou Sandhu *et al.* (2008) proposent un service « Minéralisation de l'azote », qui décrit la capacité de l'écosystème à minéraliser l'azote organique. Dans le même ordre d'idée, le service « Fixation de l'azote atmosphérique » est proposé par Barrios (2007), Sandhu *et al.* (2008), Smith *et al.* (2011), Smith *et al.* (2013), et fait référence à la fixation symbiotique de l'azote atmosphérique. Pour ces deux services, il s'agit d'évaluer les sources d'azote qui contribuent à la production végétale. Par contre, ils ne couvrent chacun que l'un des processus qui permet de fournir de l'azote aux plantes. Porter *et al.* (2009), quant à eux, proposent un service basé sur les deux processus de minéralisation et de fixation. Keith *et al.* (2016) décrivent un service très général de « disponibilité en azote » (*nitrogen availability*).

- Enfin, on recense un service « rétention d'azote » (*nitrogen retention*) proposé par exemple par Dominati *et al.* (2014), Xue *et al.* (2015), Rankinen *et al.* (2014). Ce service représente la quantité d'azote qui n'est pas perdue par l'écosystème par lixiviation, ruissellement ou érosion. L'idée est ici de considérer l'azote qui reste piégé dans le sol et n'est pas transféré à d'autres compartiments de l'environnement ; pour ces auteurs, il ne s'agit donc pas d'évaluer la façon dont cet élément contribue à la croissance végétale, bien que, théoriquement, on puisse concevoir un lien entre cet azote fixé par l'écosystème et l'azote utilisé par les plantes. Les propositions de ces auteurs sont donc plus en phase avec les services « régulation de la qualité des eaux drainées vis-à-vis des nutriments » et « régulation du climat ».

Remarques :

- On notera que des services dont le nom est identique recouvrent des finalités différentes. Ainsi, Rutgers *et al.* (2012) définissent un service assez général de *retention and release*, dont la finalité est la quantification de l'azote pour la production végétale, et non pour celle de la régulation de la qualité de l'eau.

- Plusieurs auteurs définissent un service très général qui englobe le rôle que joue l'azote dans la croissance végétale mais ne lui donne pas une place spécifique. Ainsi, Faber and van Wensem (2012) définissent un service de « fertilité des sols » (*soil fertility*) et Grimaldi *et al.* (2014) définissent un service de « qualité chimique des sols » (*soil chemical quality*). Dans ces deux cas, les indicateurs choisis pour évaluer le service contiennent une information sur la quantité d'azote présente dans le sol, aux côtés d'autres paramètres descripteurs du sol.

Après analyse des différentes propositions de la littérature, et considérant i) que l'azote dans l'écosystème agricole est fondamentalement utile pour la production de biomasse végétale et ii) que le service « régulation de la qualité des eaux vis-à-vis des nutriments » (incluant les formes azotées) est proposé par ailleurs dans l'étude EFESE-écosystèmes agricoles, nous définissons ici le service « **Fourniture d'azote (N) minéral aux plantes cultivées ».** Comme pour d'autres services évalués dans cette étude, l'extension verticale de l'écosystème qui fournit ce service s'étend de la base de la zone racinaire (base du sol) au toit de la canopée. Il est donc déterminé par le cycle de l'azote dans le sol et dans la plante. Ce SE correspond au **processus de fourniture d'azote par l'écosystème agricole aux plantes cultivées dans cet écosystème,** considérant un état donné de l'écosystème. **Ce SE ne recouvre pas les entrées d'azote liées aux pratiques de fertilisation minérales et organiques et aux dépôts atmosphériques**.

Tous les écosystèmes sont concernés, mais, de par sa définition en lien avec les plantes cultivées, ce service est très spécifique des écosystèmes agricoles. On caractérisera la capacité du sol à fournir de l'azote minéral, et la quantité d'azote présente dans le sol et dans la plante.

8.8.1.2. Bénéficiaires et avantages dérivés du SE

Les bénéficiaires de ce service sont l'agriculteur et la société. Nous définissons les avantages suivants :

- Pour **l'agriculteur** : l'économie d'intrants azotés d'origine minérale[2] (fertilisation minérale) que l'agriculteur peut réaliser en maintenant son niveau de production (avantage direct) ;

- Pour la **société** : la réduction de pollution que la société peut réaliser en limitant sa production par la méthode Haber-Bosch et son utilisation de fertilisants minéraux azotés (avantage indirect) ;

[2] Hirel et al. (2011) estiment en effet que 50% des coûts de production supportés par l'agriculteur sont liés à la fertilisation minérale (ce coût étant supérieur à celui généré par l'introduction de légumineuses fixatrices de diazote).

8.8.1.3. Déterminants biophysiques clefs du SE

La plante prélève l'azote par son système racinaire depuis le compartiment sol. Les déterminants biophysiques clefs du service « fourniture d'N minéral aux plantes cultivées » sont donc de deux natures : i) des processus de l'écosystème qui permettent les échanges entre le compartiment sol et le compartiment plante, et ii) des propriétés ou caractéristiques de chacun de ces compartiments, qui permettent la réalisation de ces processus. Nous structurons la présentation des déterminants selon les processus :

• Deux processus permettent l'entrée d'azote dans le sol : la **fixation symbiotique[3] de N_2**,, et **l'apport de matière organique fraîche par les végétaux** soit *via* l'apport de matériel végétal sénescent soit *via* la production d'exsudats racinaires [4]. Les légumineuses fixent l'azote atmosphérique par voie symbiotique grâce à leur association aux bactéries du genre Rhizobium. Des valeurs de coefficient de fixation symbiotique sont disponibles dans Anglade (2015) et Anglade *et al.* (2015) qui présentent en outre une revue bibliographique complète sur les mesures de coefficient de fixation dans différents contextes agropédoclimatiques et pour différentes cultures. Ces quantités d'azote fixées dépendent ainsi des espèces de légumineuses, des souches de Rhizobium, et de certaines caractéristiques et états du sol, notamment le pH et l'humidité (Nicolardot *et al.*, 1996).

• Les processus biologiques de **fragmentation et d'incorporation** opérés par la faune du sol, respectivement les « ingénieurs des litières » et les « ingénieurs des sols » (vers de terre anéciques, les termites et les fourmis), permettent la transformation des matières organiques fraiches en matières organiques particulaires et leur incorporation dans les premiers horizons du sol.

• Deux types de processus permettent la mise à disposition d'azote à la plante depuis le sol : la **minéralisation**, qui transforme l'azote organique en azote minéral biodisponible, et les processus à l'origine des mouvements d'azote minéral dans les sols, la **diffusion et la convection**, qui le transporte depuis l'ensemble du sol vers la rhizosphère, lieu des échanges avec la plante. Les plantes, *via* leurs exsudations racinaires, peuvent stimuler l'activité de minéralisation. On parle alors de « *priming effect* », c.-à-d., de l'effet stimulant de l'apport de matière organique fraiche sur l'activité de décomposition de la matière organique. La minéralisation de l'azote organique en azote minéral (NH_{4+}, NO_{3-}) est due à une succession de processus microbiologiques par la microflore et la microfaune, sous l'influence de la température et de la teneur en eau du sol, ainsi que du pH. On qualifie ce processus grâce au potentiel de minéralisation de l'azote. Des valeurs de potentiel de minéralisation sont disponibles pour certains sols dans le modèle STICS et des données pour quelques sols-types français sont disponibles dans (Valé, 2006). La diffusion est le phénomène de migration d'une substance sous l'influence du gradient de concentration. La convection est le phénomène de transport des substances par les flux d'eau. Elle dépend principalement de la porosité du sol et de sa teneur en eau.

• Le processus **d'organisation** conduit au stockage d'azote dans le sol sous forme d'azote organique, non disponible pour la plante. L'azote minéral - ammoniacal et nitrique - est assimilé par la microflore et transformé en azote organique. Ce processus est donc un processus biologique sous la dépendance des conditions du milieu (température, humidité, aération). On notera qu'organisation et minéralisation sont des processus inverses, et que la quantité d'azote finalement disponible correspond à ce qui est appelé minéralisation nette.

• Plusieurs processus conduisent à des sorties d'azote du système étudié, soit sous forme gazeuse pour la **volatilisation** (sortie de N sous forme NH_3), les **émissions de N_2O** (sortie de N sous forme N_2O), et la **réduction** (sortie de N sous forme N_2), soit sous forme liquide pour la **lixiviation** (sortie de N sous forme NO_3^-). Ces processus sont sous la double dépendance de caractéristiques microbiologiques du sol qui réalisent la chaîne de réduction de l'azote depuis la forme NH_{4+} jusqu'à la forme N_2, et de caractéristiques physiques du milieu qui permettent le transfert de ces formes gazeuses ou dissoutes d'une position donnée dans le sol jusqu'à sa surface (pour les formes gazeuses) ou jusqu'à la base du sol (pour les formes dissoutes).

• Enfin, l'azote minéral disponible est absorbé par la couverture végétale par le processus **d'assimilation**.

[3] L'azote peut être également fixé de façon dite « libre » par certains types de bactéries aérobies, mais cette fixation libre est considérée comme négligeable dans les sols cultivés non inondés, comme c'est le cas en France (Nicolardot et al., 1996).
[4] L'apport de matières organiques fraîches par les parties aériennes est, en milieu agricole, fortement lié aux pratiques agricoles, et sera traité dans le paragraphe suivant.

Remarque : la composition dans le temps et l'espace de la couverture végétale de l'écosystème agricole, c.-à-d. sa configuration (Cf. chapitre 5), détermine fortement la capacité de l'écosystème à fournir de l'azote aux plantes cultivées. Plus particulièrement, la présence de cultures intermédiaires permet de réduire les pertes de nitrate par lixiviation durant la période entre deux cultures de rente. Des données sur l'extension des cultures intermédiaires pièges à nitrate (et les dérogations à l'implantation) sont disponibles dans le document d'expertise collective publié par Justes et al. (2012). La présence de légumineuses permet de générer des entrées d'azote dans l'écosystème via *la fixation symbiotique de N_2.*

8.8.1.4. Facteurs exogènes clefs du SE

Le SE « fourniture d'azote minéral aux plantes cultivées » est sous la dépendance de nombreux processus physiques et biogéochimiques, eux-mêmes étant fortement en lien avec la teneur en eau dans le sol et la température. En conséquence, les pluies et l'irrigation influencent le niveau de SE, puisqu'une augmentation de la teneur en eau du sol favorise l'activité biologique, jusqu'à un seuil cependant (lui-même dépendant du caractère aérobie ou anaérobie des microorganismes impliqués). La teneur en eau du sol conditionne également le niveau de saturation du milieu et donc le réseau poreux libre à l'air et la connectivité de ce dernier, qui sont les déterminants principaux des processus de transfert dans le sol (à travers le sol, vers sa surface, ou vers la base du système racinaire). En outre, le passage d'engins en conditions humides tasse le sol, avec des conséquences ambivalentes sur le niveau de fourniture du SE : une teneur en eau proportionnellement plus grande en zones tassées qu'en zones non tassées est probablement favorable aux processus biogéochimiques de réduction, mais une porosité libre à l'air plus faible et une moindre connectivité du réseau poreux limitent la diffusion/convection (Richard *et al.*, 2001), y compris de l'azote minéral.

Le **climat** modifie également la température, paramètre fondamental des processus biologiques.

Les **pratiques agricoles** - autres que l'irrigation - influent positivement ou négativement sur le niveau de fourniture du SE. Elles sont favorables à la fourniture d'azote minéral aux plantes cultivées quand elles (i) favorisent le retour au sol d'éléments organiques de l'écosystème riches en azote (résidus de culture) et ainsi augmentent le stock de matières organiques minéralisables, et (ii) favorisent la transformation de l'azote organique en azote minéral via la stimulation de l'activité des microorganismes, tout en limitant l'organisation de l'azote minéral déjà présent dans le sol. Les interactions entre les apports de fertilisants minéraux et organiques et le SE de fourniture d'azote minéral déterminent la quantité d'azote in fine disponible pour les plantes cultivées au fil d'un cycle de végétation et au fil des années. Ainsi, Constantin *et al.* (2010), qui évaluent différentes modalités d'apport d'azote au sol, montrent, par modélisation, que la balance azotée (soit la différence entre les apports d'azote par fertilisation et les exportations d'azote par la culture) ne dépend pas, sur le long terme, que du niveau de fertilisation mais bien aussi des processus qui sous-tendent le SE fourniture d'azote minéral aux plantes cultivées.

Plus précisément, parmi les pratiques qui permettent une augmentation du niveau de SE de fourniture d'azote minéral aux plantes cultivées à court, moyen et long terme on peut citer :

- L'apport de matières organiques au sol. Des données et des cartographies à l'échelle nationale des pratiques d'apports de produits résiduaires organiques sont disponibles dans le document d'expertise collective sur la valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire (Houot and al., 2014).
- bLe travail du sol ; il a des effets directs sur le broyage et l'enfouissement des matières organiques (exogènes ou résidus de culture) et sur la structure du sol (Mary *et al.*, 2014). Il a des effets indirects sur la température et la teneur en eau du sol, et sur les transferts d'eau et de gaz dans les sols puisqu'il modifie la structure. Mary *et al.* (2014) mentionnent cependant que la réduction du travail du sol ne modifierait pas significativement le niveau de fourniture d'azote minéral aux plantes cultivées.
- La restitution des résidus de culture au sol (voir ci-dessous).

L'efficacité des pratiques sur la quantité d'azote disponible est variable :

- La contribution des résidus de culture à la fourniture d'azote minéral est fortement liée au rapport C/N des résidus (Recous *et al.*, 2014) : des résidus de plantes riches en tissus de soutien (ex. lignifié) ou arrivées à maturité (pailles de blé, par exemple), à rapport C/N élevé, se dégradent lentement et l'azote présent dans les résidus peut être immobilisé par les micro-organismes du sol (et non transformé en azote minéral disponible pour les plantes). Au contraire, des résidus de plantes à faible teneur en tissu de soutien ou jeunes (cas de cultures

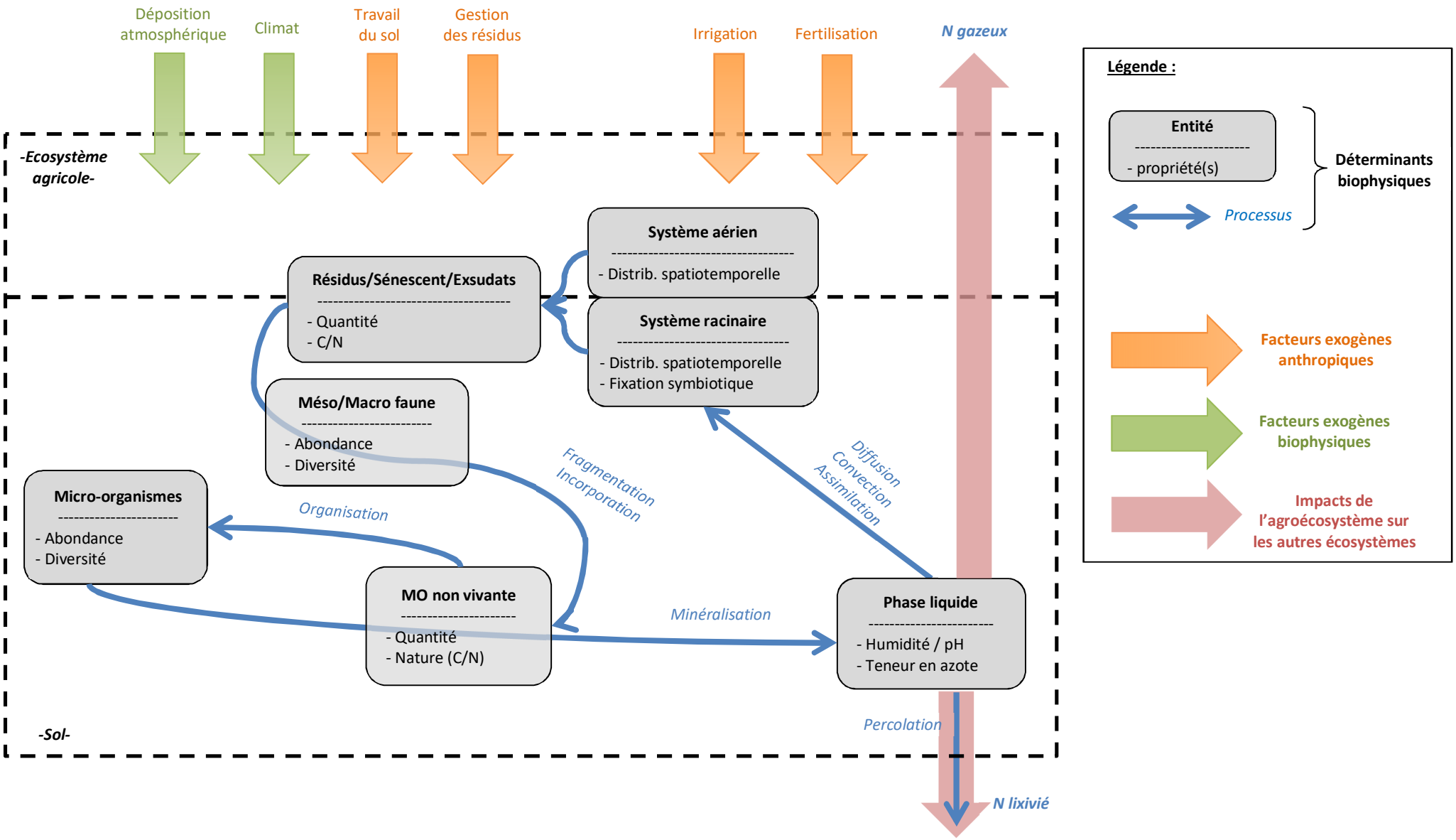
intermédiaires de type CIPAN, par exemple), à rapport C/N faible, se dégradent rapidement dans le sol et fournissent de l'azote minéral rapidement disponible (Justes *et al.*, 2009).

- Les effets du travail du sol sur la disponibilité en azote sont complexes et parfois ambivalents (Mary *et al.*, 2014) : à long terme, le stock d'azote organique ne serait pas modifié par une évolution de l'intensité du travail du sol, qui n'affecte pas non plus la vitesse potentielle de minéralisation. En revanche, la période/date du travail du sol influe sur les conditions de minéralisation en modifiant localement, dans l'horizon de surface, les conditions de température et d'humidité, qui sont des facteurs essentiels de la minéralisation. Enfin, les pratiques agricoles qui limitent l'incorporation des résidus de culture au sol ralentissent la cinétique de minéralisation car ces résidus sont placés dans des conditions d'humidité moins favorables à leur biodégradation. En tout état de cause, les effets des pratiques de travail du sol auraient une moindre importance sur le niveau de fourniture du SE, comparativement à la fertilisation organique et à l'implantation de couverts végétaux à forte production et à faible rapport C/ N.

Enfin, pour bien appréhender l'ensemble des facteurs exogènes qui déterminent les flux d'azote dans l'écosystème agricole, il est nécessaire de prendre en compte le processus de **déposition atmosphérique**. La littérature présente des données surtout sur les écosystèmes forestiers (voir, par exemple, les cartes de retombées atmosphériques de nitrate ou d'ammonium produites par l'ONF). Une carte européenne (déjà ancienne) des dépôts atmosphériques est disponible dans (Holland *et al.*, 2005).

Les déterminants biophysiques clefs de la fourniture du SE sont schématisés dans la figure 8-8-2.

Figure 8-8-2. Représentation schématique des principaux déterminants biophysiques et des exogènes impliqués dans la fourniture du SE « Fourniture d'azote minéral aux plantes cultivées »



8.8.2. Evaluation biophysique du niveau de fourniture du SE

Expert coordinateur : Isabelle Cousin
Contributeurs scientifiques : Olivier Therond, Julie Constantin
Ingénierie de données : Eric Casellas, Julie Constantin, Anne Meillet, Thomas Poméon, Hélène Raynal

8.8.2.1. Méthodologie et indicateurs pour l'évaluation biophysique du SE

Stratégies d'évaluation définies dans la littérature

1. Indicateurs du programme MAES et du JRC

Dans la démarche MAES, le service lié à l'azote considéré est celui de « rétention d'azote » (*nitrogen retention*) au sens de « **quantité d'azote du sol qui n'est pas lixiviée ou perdue par ruissellement** ». Cet indicateur, calculé à l'échelle de bassins versants, vise à estimer l'azote qui reste piégé dans le sol et ne pollue pas d'autres compartiments de l'écosystème, autrement dit, il est question d'un SE de type régulation de la qualité de l'eau (Cf. introduction). Il permet aussi d'estimer la quantité d'azote présente dans le sol et potentiellement utilisable par les plantes, soit la capacité de l'écosystème de l'écosystème à fournir de l'azote aux plantes cultivées (le niveau potentiel/maximal de SE). Cet indicateur ne tient cependant pas compte d'éventuelles pertes d'azote sous forme gazeuse. Pour évaluer la quantité d'azote présente dans le sol il serait donc nécessaire de retenir un indicateur correspondant à la « **quantité d'azote qui n'est pas lixiviée, ou perdue par ruissellement, ou perdue sous forme gazeuse vers l'atmosphère** ». Cette proposition est en accord avec les évaluations les plus récentes de la littérature, puisque Dominati *et al.* (2014), Rankinen *et al.* (2014) et Xue *et al.* (2015) proposent de façon équivalente de comparer des entrées et des sorties d'azote du système pour évaluer le stock retenu par le sol. Cependant pour ces auteurs, comme dans la démarche MAES, la finalité n'est pas l'utilisation de l'azote par les végétaux.
Par ailleurs, dans la démarche MAES, comme la finalité du calcul est de connaître la quantité d'azote présente dans les rivières, l'évaluation de l'indicateur est réalisée à l'aide du modèle GREEN (Geospatial Regression Equation for European Nutrient losses) qui estime, à partir des apports d'azote à l'écosystème, la fraction d'azote stockée dans les écosystèmes non aquatiques et la fraction stockée dans les rivières. Cette méthodologie n'est pas pertinente pour les objectifs de notre étude.

2. Autres indicateurs du service « Fourniture d'azote (N) minéral aux plantes cultivées » dans la littérature

De nombreux auteurs proposent un indicateur qui décrit la quantité d'azote présent dans le sol. Dans leur review, Bastida *et al.* (2008) mentionnent que cet indicateur est : la « **quantité d'azote total** », ou la « **quantité d'azote biodisponible** », ou la « **teneur en azote dans la biomasse microbienne** », ou la « **teneur en nitrate et en ammonium** », ou la « **teneur en azote du grain** », ou la « **teneur en azote minéralisable** ». L'indicateur « **quantité d'azote dans le sol** » est cependant celui qui est le plus fréquemment proposé (par exemple : (Mulder *et al.* (2011); McBratney *et al.* (2014); Keith *et al.* (2016)) et, comme nous l'avons précisé plus haut, Sandhu *et al.* (2008) exposent que la valeur de cet indicateur représenterait 2% de la quantité d'azote disponible pour les plantes. En outre, la quantité d'azote minéral dans le sol varie au cours de l'année culturale, en raison des nombreux processus qui la font évoluer. Enfin, une ambiguïté persistante dans la littérature concerne l'épaisseur sur laquelle il faut calculer cet indicateur (sur l'horizon de surface ou sur l'épaisseur de sol ?). Nous ne retenons donc aucun de ces indicateurs, mais nous précisons que, à l'échelle nationale, des données de concentration en azote total dans l'horizon de surface des sols sont disponibles dans les bases de données du GISSOL (Figures 8-8-3 et 8-8-4) et permettraient l'évaluation, à un instant donné, du stock d'azote dans le sol.

Figure 8-8-3. Concentration en azote dans les horizons de surface des sols échantillonnés dans le cadre du programme RMQS - Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (Antoni *et al.*, 2011).

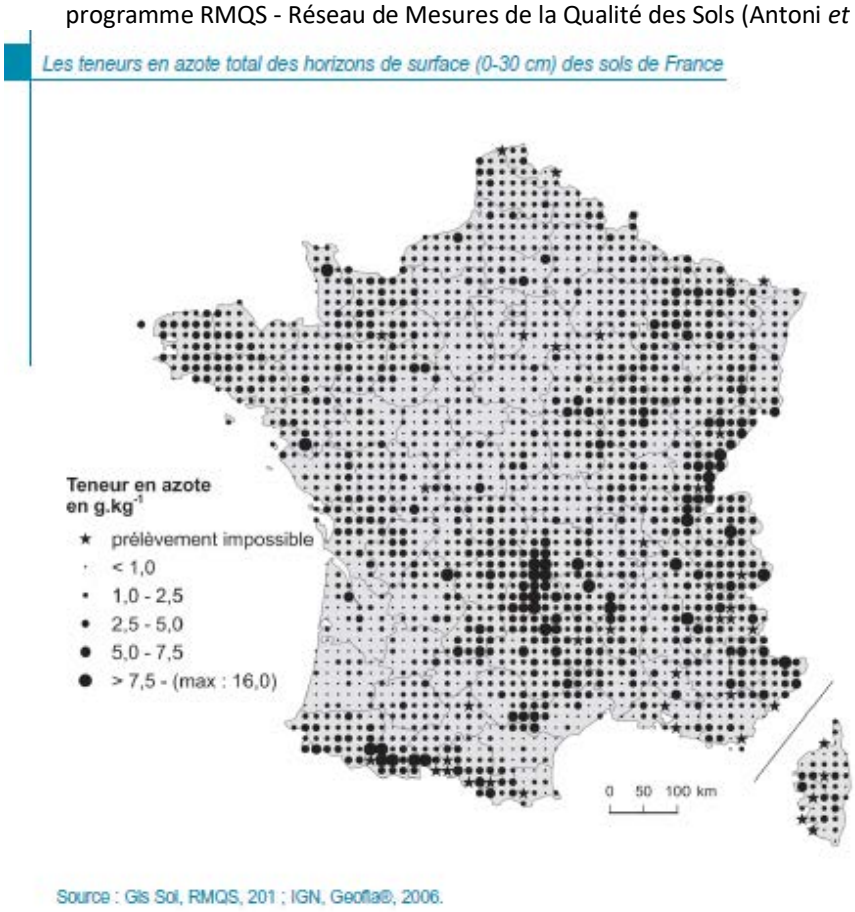
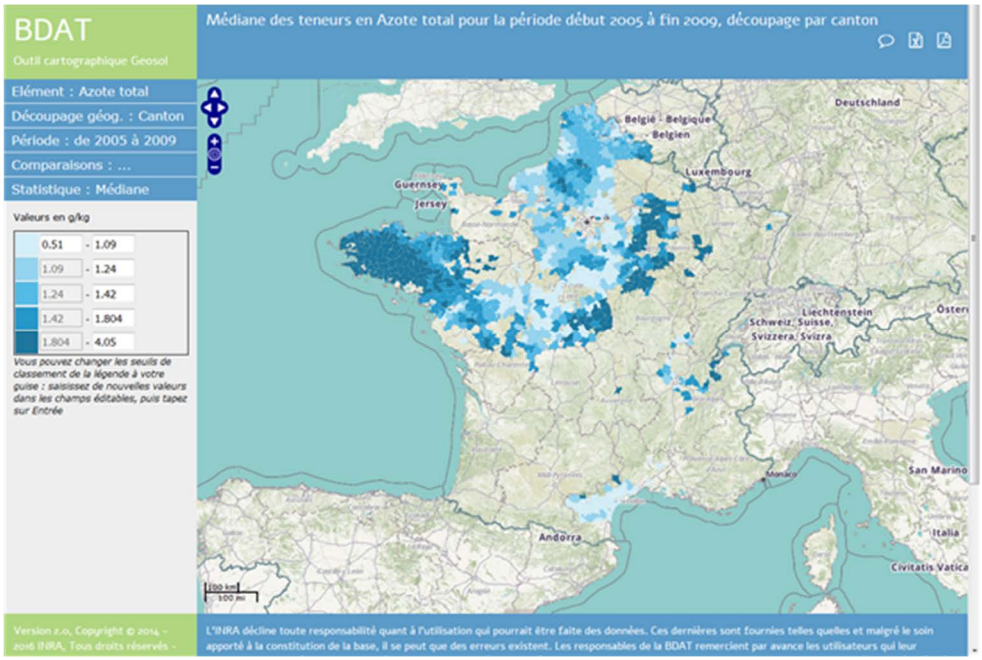


Figure 8-8-4. Concentration médiane en azote dans les sols par canton. Données issues de la BDAT (Base de Données des Analyses de Terres)
(extraction du site http://estrada.orleans.inra.fr/geosol/ le 21/01/2016).



Robinson *et al.* (2009) proposent l'indicateur « rapport C/N » pour qualifier les services en lien avec le cycle de l'azote, mais Keith *et al.* (2016) le récusent car cet indicateur qualifie surtout la qualité des matières organiques, et non la disponibilité réelle en azote. En accord avec cette analyse, nous ne recommandons pas l'usage de cet indicateur.
Hewitt *et al.* (2015) proposent un indicateur de quantité d'azote présent dans le sol qui serait calculé à l'aide du rapport entre la quantité d'azote apportée par la fertilisation et la quantité d'azote lessivée. Nous ne recommandons pas l'usage de cet indicateur, intimement lié aux pratiques agricoles, et qui nécessite *une évaluation précise de la teneur en azote des produits d'apport*.
Pour qualifier la quantité d'azote réellement utilisable par la plante, plusieurs auteurs proposent de qualifier la « quantité d'azote minéralisable » (*total mineralizable N, Net N mineralization, potential N mineralization*) (Rutgers *et al.*, 2012; Williams and Hedlund, 2013, 2014; Keith *et al.*, 2016), ou la « vitesse potentielle de minéralisation » (Andrews *et al.*, 2004; van Wijnen *et al.*, 2012). Ces deux indicateurs peuvent être quantifiés par des expérimentations en laboratoire et sont disponibles pour quelques sols-types français (Valé, 2006). Ils ne sont cependant pas déterminés en routine sur l'ensemble des sols français dans le cadre du Réseau de Mesures de la Qualité des Sols.

Indicateurs et méthodologie d'évaluation retenus dans l'étude EFESE-écosystèmes agricoles

1. Proposition d'indicateurs du SE « Fourniture d'azote minéral aux plantes cultivées »

Pour pallier les limites des indicateurs présentés ci-avant, dans cette étude, nous proposons de retenir les deux indicateurs suivants :

- Pour évaluer la quantité d'azote fournie par l'écosystème *via* la minéralisation de la matière organique et la fixation symbiotique et réellement utilisée par la culture au cours de sa croissance, nous proposons donc, à l'instar de Bastida *et al.* (2008), de considérer l'indicateur « **quantité d'azote dans la culture de rente** ». Cet indicateur donne donc une information sur le service effectif rendu, en exprimant la quantité d'azote fourni par l'écosystème et que la plante a réellement utilisée. Il doit être calculé sur une période donnée (année), pour un état (organique) initial donné, en considérant les seuls apports d'azote issus de l'écosystème (*via* la minéralisation nette de la matière organique et la fixation) et non pas les apports d'azote exogène.
- Pour évaluer le niveau de service potentiel, nous proposons l'indicateur « **quantité d'azote potentiellement disponible pour la culture de rente** » fourni par l'écosystème *via* la minéralisation de la matière organique et la fixation symbiotique, ci-après appelé « quantité d'azote fournie par l'écosystème ».

2. Proposition d'une méthodologie d'évaluation par modélisation et limites de l'approche

Pour quantifier les indicateurs sélectionnés, il est possible d'utiliser un **modèle de culture, tel que** STICS, incluant un **modèle de bilan azoté** (FAO, 2003). Ce type de modèle permet de simuler au pas de temps journalier les flux d'azote clefs sous-tendant le niveau de SE, minéralisation, organisation, fixation symbiotique, pertes d'azote par lixiviation et émissions gazeuses. L'analyse des variables de sorties peut permettre de quantifier les deux indicateurs proposés.

Aussi, pour évaluer les différents indicateurs de niveau de service, différents types de simulations avec le modèle STICS ont été réalisées.
Un premier jeu de simulations a été développé pour simuler les systèmes de culture actuels mais en supprimant les apports de fertilisants minéraux et organiques, tout en maintenant les autres pratiques agricoles à leur niveau classiquement observé, notamment la quantité d'eau apportée par l'irrigation. La mise en œuvre de ce jeu de simulation visait à permettre d'évaluer l'indicateur « quantité d'azote dans la culture de rente ». Cependant les résultats moyens sur 30 ans de ces simulations se sont avérés non utilisables. En effet, les simulations sans apports d'azote sur 30 années de simulation conduisent à de très faibles entrées annuelles de matière organique, une réorganisation de l'azote minéral importante dans un sol pauvre en azote avec apport de résidu de culture, et donc, par conséquent à une très forte diminution du taux d'azote organique du sol au fil des années, à de très faibles disponibilités annuelles en azote minéral et, *in fine*, à de très faibles niveaux de production et d'azote absorbé par la plante, non-représentatifs, en moyenne sur 30 ans, de ce que l'état initial de l'écosystème permet

de générer. Des solutions pour pallier les problèmes de non représentativité de ces simulations sont présentées dans l'annexe 8-A. Pour des raisons de contraintes de temps et de moyens, elles n'ont pas pu être mises en œuvre dans EFESE-écosystèmes agricoles. Aussi, cet indicateur de SE effectif n'a finalement pas été estimé.

Pour évaluer le deuxième indicateur de manière pertinente, le jeu de simulations représentant les systèmes de culture « actuels » avec des niveaux de fertilisation minérale et organique observés à l'échelle régionale a été utilisé (cf. Annexe 8-A). Seul cet indicateur de SE, « **quantité d'azote potentiellement disponible pour la culture de rente** », a donc été évalué. Cependant, la variable « quantité d'azote dans la culture de rente » estimée à l'aide du jeu de simulation « système actuels » (avec fertilisation) a été utilisée pour interpréter les résultats d'évaluation du SE « fourniture d'azote minéral aux plantes cultivées ».

3. Des sorties de STICS à l'indicateur de SE

L'indicateur de niveau de SE « quantité d'azote potentiellement disponible pour la culture de rente », issu des sorties de STICS, est décliné sous forme de deux expressions :

1. La **quantité d'azote minéral total fourni par l'écosystème, *pendant la période de croissance de la culture*, *sans prise en compte* de la quantité d'azote minéral dans le sol au moment du semis** [$Q_{Sol\text{-}S}$].

$$Q_{Sol\text{-}S} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

2. La **quantité d'azote minéral total fourni par l'écosystème *pendant la période de croissance de la culture* cumulée avec la quantité d'azote minéral dans le sol au moment du semis** [$Q_{Sol\text{-}F}$].

$$Q_{Sol\text{-}F} = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$$

Avec :

Q_1 : Quantité d'azote minéralisé par l'humus (entre la date de semis et la date de la récolte)

Q_2 : Quantité d'azote minéralisée par les résidus (entre la date de semis et la date de la récolte)

Q_3 : Quantité d'azote fixée symbiotiquement (entre la date de semis et la date de la récolte)

Q_4 : Quantité d'azote minéral disponible au jour du semis.

Ces deux indicateurs sont calculés sur la période semis-récolte de la culture de rente en moyenne sur les trente années de simulation.

Il est important de noter que la quantité d'azote fournie par l'écosystème à l'année *n* n'est pas indépendante de la fertilisation de l'année *n-1*, puisque les résidus de culture de l'année *n-1* participent à la minéralisation de l'année *n* et que l'azote minéral disponible dans le sol en année *n* peut significativement dépendre des apports de fertilisation en année *n-1*.

8.8.2.2. Stratégie retenue pour l'analyse du SE

Les trois grands types de questions auxquelles l'analyse cherche à répondre sont les suivants :

1. Quels sont les valeurs et/ou les ordres de grandeur des deux valeurs de l'indicateur du SE ? Comment cet indicateur varie-il en fonction de la séquence de culture, des caractéristiques du sol, et des caractéristiques du climat ? Quelle est la distribution spatiale des niveaux de fourniture du SE évalué ? Quelles sont les relations entre les indicateurs de SE et la quantité d'azote dans la culture à la récolte ?

2. Dans quelle mesure la présence de cultures intermédiaires détermine-t-elle le niveau de fourniture des SE ?

3. Dans quelle mesure la présence de légumineuses détermine-t-elle le niveau de fourniture des SE ? Pour relativiser cette analyse, on notera i) que la présence de légumineuses dans les rotations simulées est peu fréquente et concerne peu d'unités de simulations (Figure 8-8-5) et ii) que les couverts intermédiaires simulés (ray-grass et moutarde exclusivement) ne comportent pas de légumineuse.

Remarque : nous n'analysons pas l'effet du type de fertilisation (minérale vs organique) sur le niveau de fourniture du SE, mais nous commenterons – si cela s'avère pertinent – les cartes obtenues au regard de la quantité moyenne de fertilisants apportés (Figure 8-8-6).

Figure 8-8-5. Carte de distribution des cultures de légumineuses dans le dispositif de simulation EFESE-écosystèmes agricoles

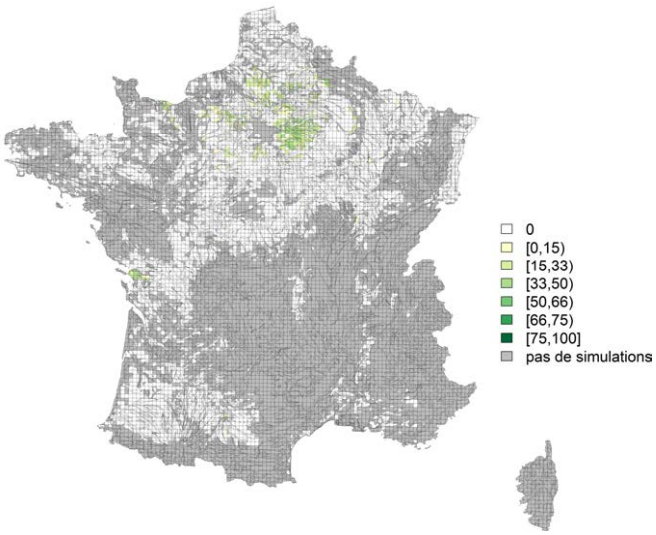
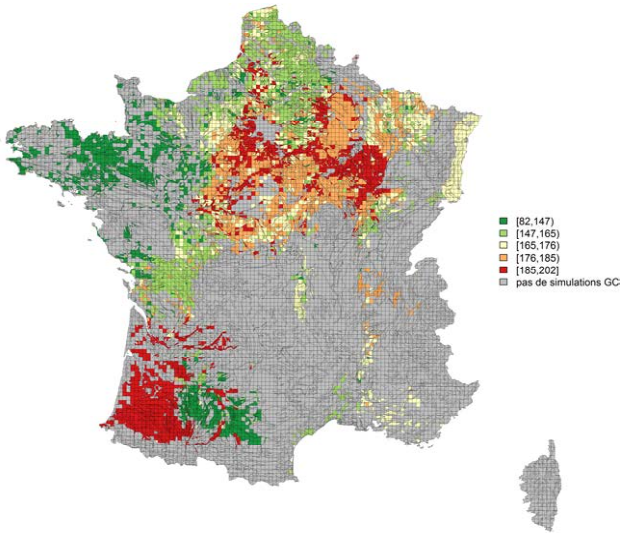


Figure 8-8-6. Quantité d'azote apportée annuellement par fertilisation minérale et organique en moyenne par UPC dans le dispositif de simulation EFESE-écosystèmes agricoles

Les classes de valeurs correspondent à des quintiles



Pour chaque valeur de l'indicateur, l'analyse est conduite selon trois axes en lien avec les déterminants principaux potentiels du service :

- l'effet de la séquence de culture ; pour analyser cet effet, nous utilisons une typologie relative à la durée des séquences de culture : monocultures, rotations « de durée moyenne », c'est-à-dire inférieures ou égales à trois ans, rotations « de durée longue », c'est-à-dire supérieures ou égales à quatre ans ; nous analysons également l'effet de la présence ou non de cultures intermédiaires dans la rotation. Le chapitre 8.7 (figures 8-7-9 et 8-7-10) présente les caractéristiques de cette typologie.

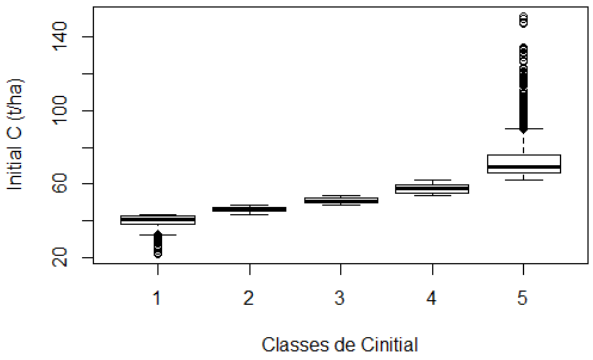
- l'effet du sol ou de ses propriétés ; pour analyser le rôle du déterminant « sol », nous utilisons essentiellement deux critères : d'une part, la texture de l'horizon de surface du sol en 5 classes issue de la Base de Données Géographique des Sols de France au 1/1 000 000ème (Figure 8-7-12 du chapitre 8.7) ; d'autre part, la quantité de matière organique présente dans le sol initialement (premier jour de la simulation), soit l'état organique initial du sol (Figure 8-8-7) (voir section 8.12). Ponctuellement, nous utilisons également une typologie basée sur la classe de Réserve en Eau Maximale du sol (RUM), décrite au chapitre 8.7[5].

- l'effet du climat ; pour analyser l'effet du climat, nous utilisons la typologie proposée par (Joly *et al.*, 2010) et dont une description précise est disponible au chapitre 8.7[6].

[5] Les 4 classes de RU sont les suivantes : classe 1 : 0 < RUM < 40 mm ; classe 2 : 40 < RUM < 80 mm ; classe 1 : 80 < RUM < 120 mm ; classe 1 : 120 mm < RUM.

[6] Les 8 types de climat sont les suivants : type 1 : climats de montagne ; type 2 : climat semi-continental et climat des marges montagnardes ; type 3 : climat océanique dégradé des plaines du Centre et du Nord ; type 4 : climat océanique altéré ; type 5 : climat océanique franc ; type 6 : climat méditerranéen altéré ; type 7 : climat du Bassin du Sud-Ouest ; type 8 : climat méditerranéen franc.

Figure 8-8-7. Distribution de la teneur en carbone organique dans le sol à l'initialisation des simulations. Les classes sont équiprobables, elles contiennent le même nombre de simulations (combinaisons de systèmes de culture et de type de sol)



Enfin, pour **analyser l'effet de la présence de légumineuse et le rôle de la fertilisation dans la couverture des besoins en azote de la culture**, nous utilisons le ratio de la quantité d'azote fournie par l'écosystème sur la quantité d'azote dans la culture de rente à la récolte. Le numérateur de ce ratio sera soit :

1. La quantité d'azote minéral total fourni par l'écosystème, *pendant la période de croissance de la culture*, *sans prise en compte* de la quantité d'azote minéral dans le sol au moment du semis [$Q_{Sol\text{-}S}$]. Il s'agit donc ici d'analyser l'effet de la quantité d'azote fourni par l'écosystème *pendant le cycle de la culture*, au regard de l'azote dans la plante.
2. La quantité d'azote minéral total fourni par l'écosystème *pendant la période de croissance de la culture* cumulée avec la quantité d'azote minéral dans le sol au moment du semis [$Q_{Sol\text{-}F}$]. Il s'agit donc ici d'analyser l'effet de l'azote fourni par l'écosystème *pendant le cycle de la culture et avant celui-ci* au regard de l'azote dans la plante. L'effet direct de la fertilisation réalisée lors du cycle précédent sur l'azote minéral disponible au semis est donc intégré dans cette analyse.
3. La quantité d'azote minéral total fourni par l'écosystème *pendant la période de croissance de la culture* cumulée avec la quantité d'azote minéral dans le sol au moment du semis, cumulée avec la fertilisation [$Q_{Sol\text{-}F\text{-}FERTI}$]. Il s'agit donc ici d'analyser si l'ensemble de l'azote, *fourni à la fois par l'écosystème pendant le cycle de la culture et avant celui-ci, et fourni par la fertilisation*, est inférieur, égal ou supérieur aux besoins de la culture.

8.8.2.3. Analyse des résultats

<u>Evaluation du niveau de SE pour les systèmes de culture actuels et les pratiques agricoles observées</u>

Nous présentons ci-après, l'analyse des résultats des simulations réalisées pour les systèmes de cultures actuels, avec les pratiques réelles observées, c'est-à-dire avec des niveaux de fertilisation tels qu'ils sont pratiqués réellement. Les autres pratiques agricoles sont simulées telles qu'elles sont pratiquées actuellement. L'irrigation est cependant simulée dans le modèle STICS par une fonction d'irrigation automatique[7]. Nous commentons les deux valeurs possibles de l'indicateur (avec et sans prise en compte de l'azote minéral au semis).

La quantité d'azote fournie par l'écosystème pendant la période de croissance de la culture est en moyenne[8] de 93 kg N /ha. Elle est de l'ordre de 90 kg N /ha en moyenne pour les sols de texture sableuse, limoneuse ou équilibrée mais beaucoup plus faible, 70 voire 42 kg N /ha en moyenne, pour les sols de texture argileuse voire très argileuse (Figure 8-8-8). On constate qu'elle est d'autant plus élevée, en moyenne, que la classe de matière organique initiale est élevée, avec un différentiel de 10 kg N /ha entre la classe 1 et la classe 5 (Figure 8-8-8): l'effet de la teneur en matière organique initiale sur la quantité d'azote minéralisée et fixée symbiotiquement

[7] On n'utilise donc pas les valeurs de quantités d'eau irriguées utilisées réellement (chapitre 8.7).
[8] Les box-plots des figures 8-8-8, 8-8-10, 8-8-12 présentent les valeurs médianes ; les valeurs moyennes sont introduites dans le corps du texte.

est suffisamment marqué en moyenne sur les 30 années de simulation pour être observé au travers de cet indicateur. Cette quantité d'azote minéralisée et fixée symbiotiquement est plus élevée pour les monocultures que pour les séquences de cultures pluriannuelles, avec une variabilité plus grande pour les monocultures que pour les cultures annuelles. On peut faire l'hypothèse que dans les monocultures de blé et maïs, souvent fortement fertilisées, lorsque les pailles ou cannes de maïs ne sont pas exportées, les apports importants de résidus de culture génèrent une importante quantité de biomasse minéralisée lors du cycle annuel de la culture suivante.

La quantité d'azote fournie par l'écosystème pendant la période de croissance de la culture cumulée avec la quantité d'azote dans le sol présente au moment du semis est, en moyenne de 143 kg/ha sur l'ensemble des unités de simulation conduites en grande culture. Elle est de l'ordre de 150 kg N /ha en moyenne pour les sols de texture sableuse, limoneuse ou équilibrée mais beaucoup plus faible, 115 voire 66 kg N /ha en moyenne, pour les sols de texture argileuse voire très argileuse (Figure 8-8-10). Elle est plus élevée pour les monocultures que pour les séquences de cultures pluriannuelles. Elle ne varie quasiment pas, en valeur moyenne, en fonction de la teneur en carbone organique initiale. Ces deux derniers effets laissent entendre que les effets de la fertilisation, direct (azote minéral dans le sol au semis) et indirect (quantité de biomasse restituée au sol), sont plus forts que celui de la quantité d'azote liée à la minéralisation de la matière organique des sols quel que soit le taux de matière organique initial.

En terme de distribution spatiale, la quantité d'azote fournie par l'écosystème pendant la période de croissance de la culture est de l'ordre de 70 à 100 kg N / ha dans les grandes plaines du Nord de la France, dans le Bassin Parisien, en Bretagne avec localement des quantités plus faibles (40 à 70 kg N / ha) et plus élevées (100 à 130 kg d'N / ha). Elle est généralement faible dans la région climatique dite « Bassin du Sud-Ouest »[9] et dans le sillon rhodanien, et élevée dans les Landes et en Alsace (Figure 8-8-9). Les régions à très forte quantité d'azote fournie par l'écosystème sont également, et de façon non surprenante, les régions où la fertilisation est particulièrement élevée, l'inverse est également constaté (Figure 8-8-6). Le même type de distribution spatiale des résultats est observé pour la quantité d'azote fournie par l'écosystème pendant la période de croissance de la culture cumulée avec la quantité d'azote dans le sol présente au semis (Figure 8-8-11).

[9] Cet effet n'est pas particulièrement visible sur les box-plots en fonction du climat des figures 8-8-7 et 8-8-9, en raison de valeurs ponctuellement très élevées (représentées ici par les outliers supérieurs du box-plot)

Figure 8-8-8. Quantité moyenne d'azote minéral fourni par l'écosystème (non cumulée avec la quantité d'azote dans le sol au moment du semis) (en kg N /ha) estimée par STICS pour des systèmes de culture conduits avec les pratiques agricoles observées

Données présentées en fonction du type de sol exprimé par la classe de texture de l'horizon de surface (a.), de la teneur en matière organique initiale (b.), de la longueur de la séquence de culture (c.) et du type de climat (d.). (Voir le paragraphe 8.7.2.2 pour les labels des classes de climat)

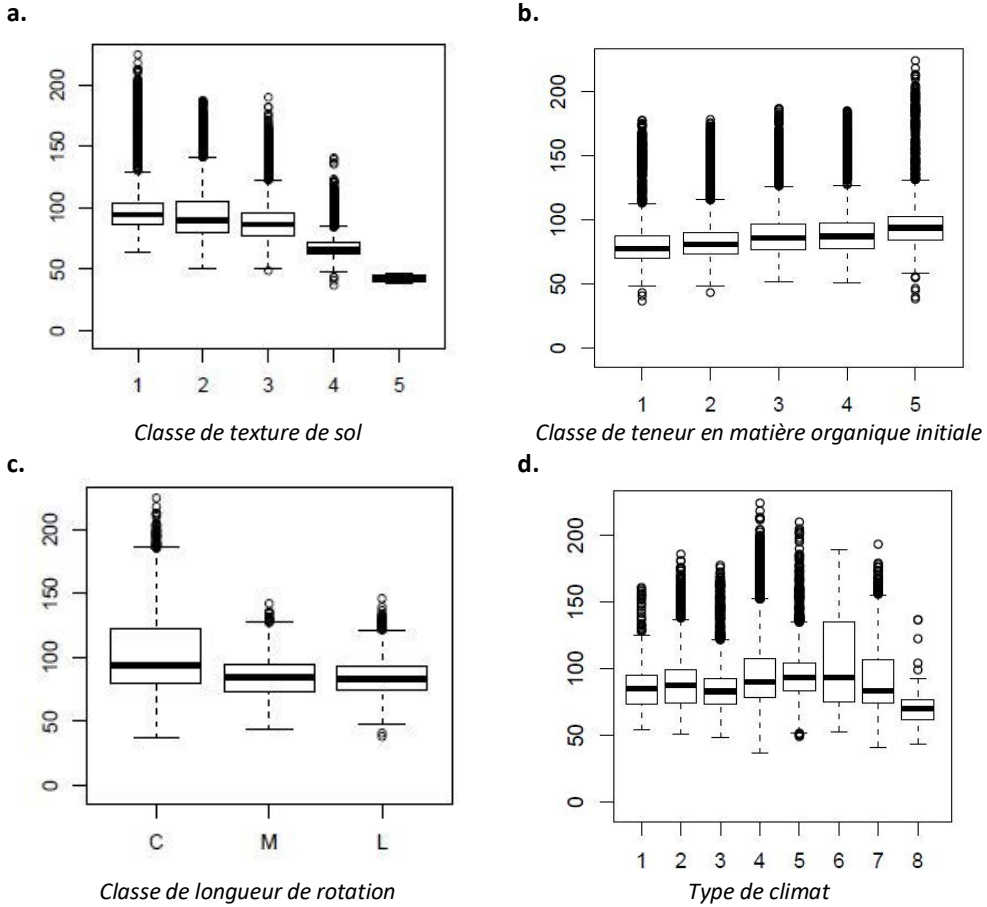


Figure 8-8-9. Carte de la **quantité moyenne d'azote minéral fourni par l'écosystème** (en kg N /ha) estimée par STICS pour des systèmes de culture conduits avec les pratiques agricoles observées

Résolution spatiale : unité pédoclimatique EFESE-écosystèmes agricoles
Les classes de valeurs correspondent à des quintiles.

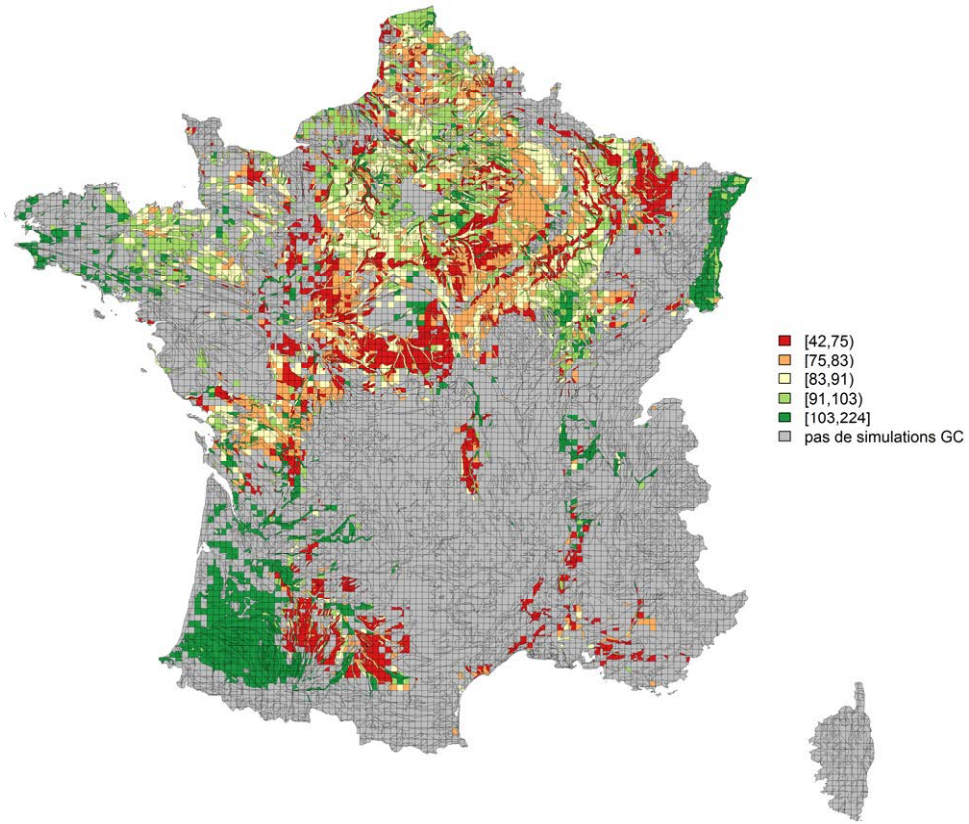


Figure 8-8-10. Quantité moyenne d'azote minéral fourni par l'écosystème, cumulée à la quantité d'azote dans le sol au moment du semis (en kg N /ha) estimée par STICS pour des systèmes de culture conduits avec les pratiques agricoles observées

Données présentées en fonction du type de sol exprimé par la classe de texture de l'horizon de surface (a.), de la teneur en matière organique initiale (b.), de la longueur de la séquence de culture (c.) et du type de climat (d.). (Voir le paragraphe 8.7.2.2 pour les labels des classes de climat)

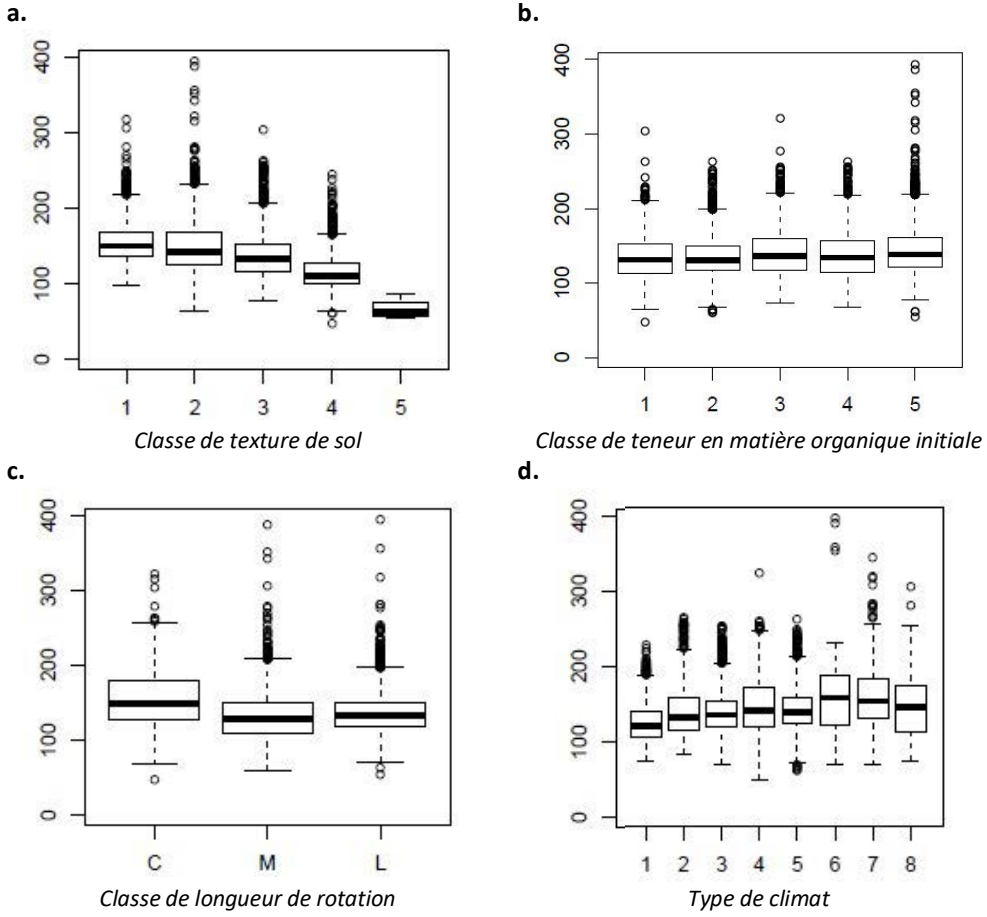


Figure 8-8-11. Carte de la **quantité moyenne d'azote minéral fourni par l'écosystème cumulée à la quantité d'azote dans le sol au moment du semis** (en kg N /ha) estimée par STICS pour des systèmes de culture conduits avec les pratiques agricoles observées

Résolution spatiale : unité pédoclimatique EFESE-écosystèmes agricoles
Les classes de valeurs correspondent à des quintiles.

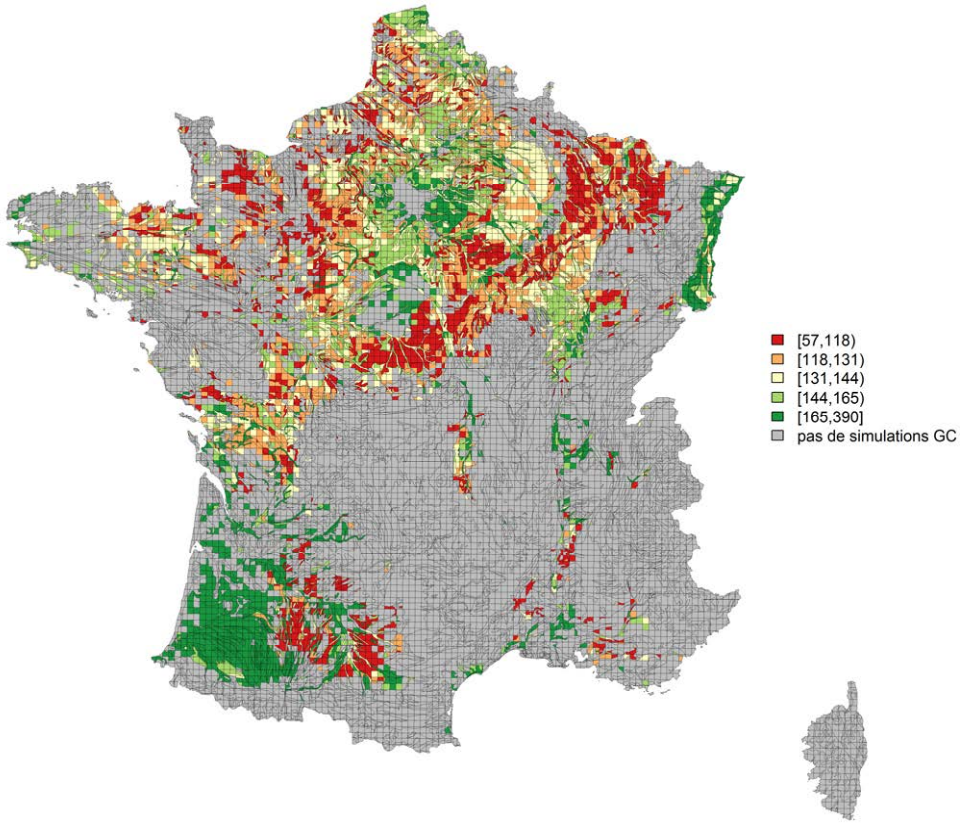


Figure 8-8-12. Quantité moyenne d'azote contenu dans la culture de rente à la récolte (en kg N /ha) estimée par STICS pour des systèmes de culture conduits avec les pratiques agricoles observées

Données présentées en fonction du type de sol exprimé par la classe de texture de l'horizon de surface (a.), de la teneur en matière organique initiale (b.), de la longueur de la séquence de culture (c.) et du type de climat (d.). (Voir le paragraphe 8.7.2.2 pour les labels des classes de climat)

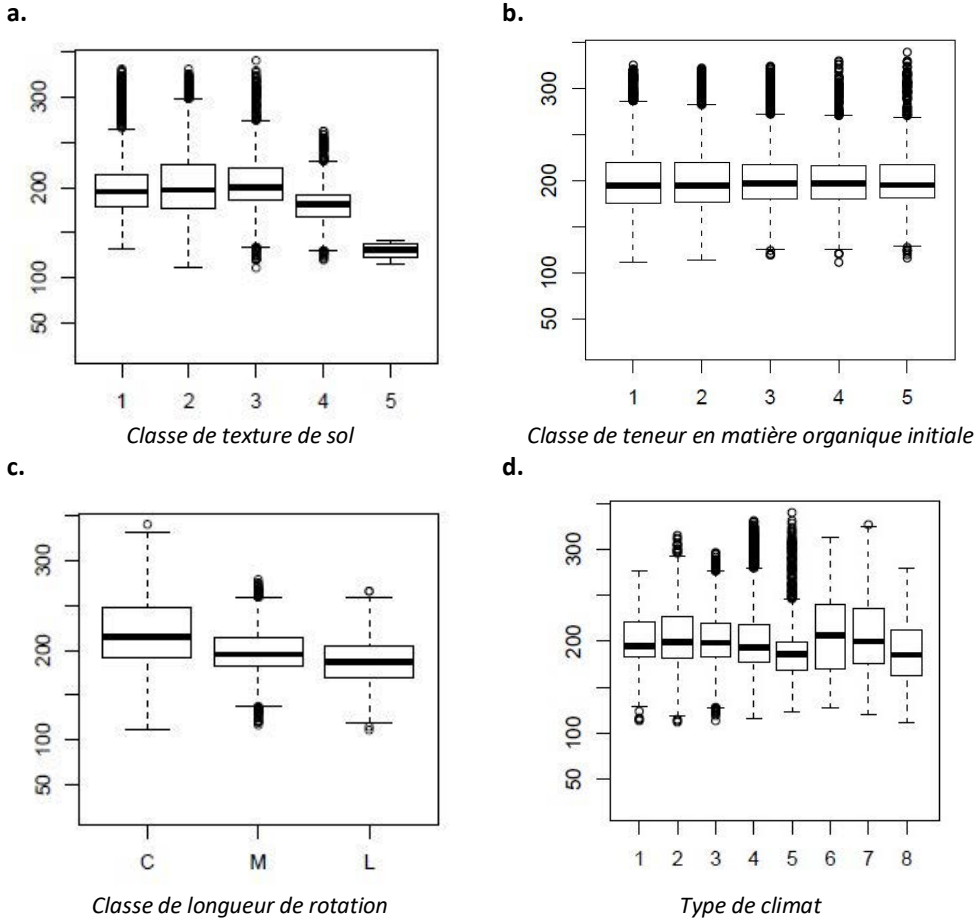
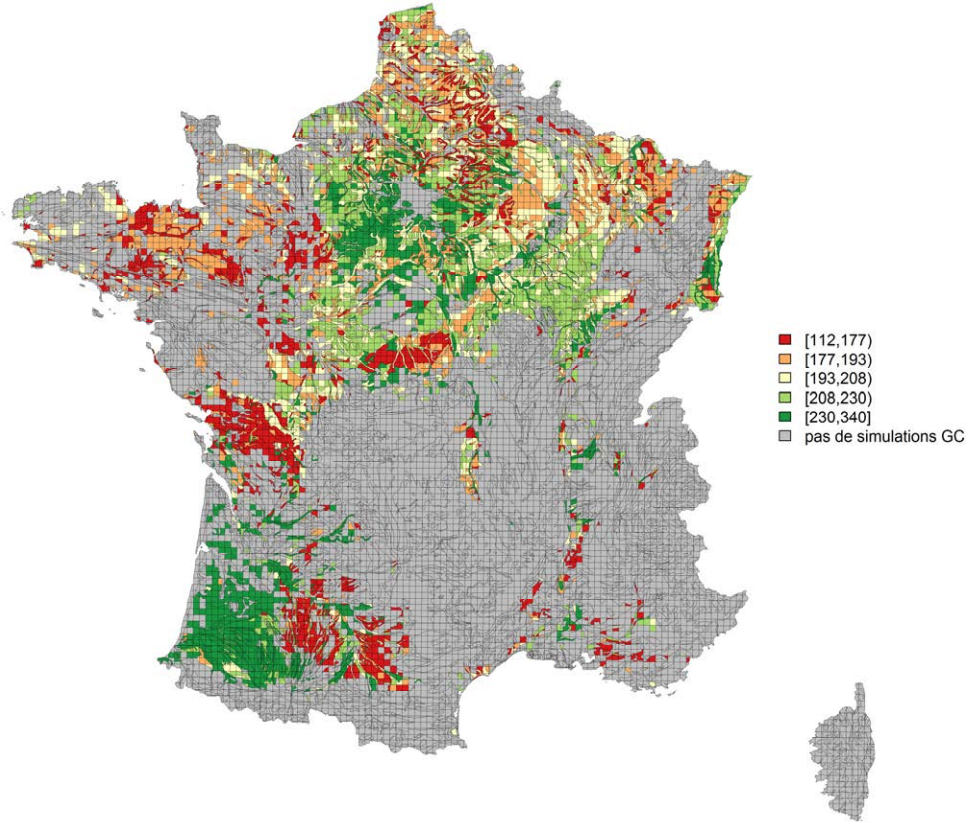


Figure 8-8-13. Carte de la **quantité moyenne d'azote contenu dans la culture de rente à la récolte** (kg N/ha) estimée par STICS pour des systèmes de culture conduits avec les pratiques agricoles observées

Résolution spatiale : unité pédoclimatique EFESE-écosystèmes agricoles
Les classes de valeurs correspondent à des quintiles.



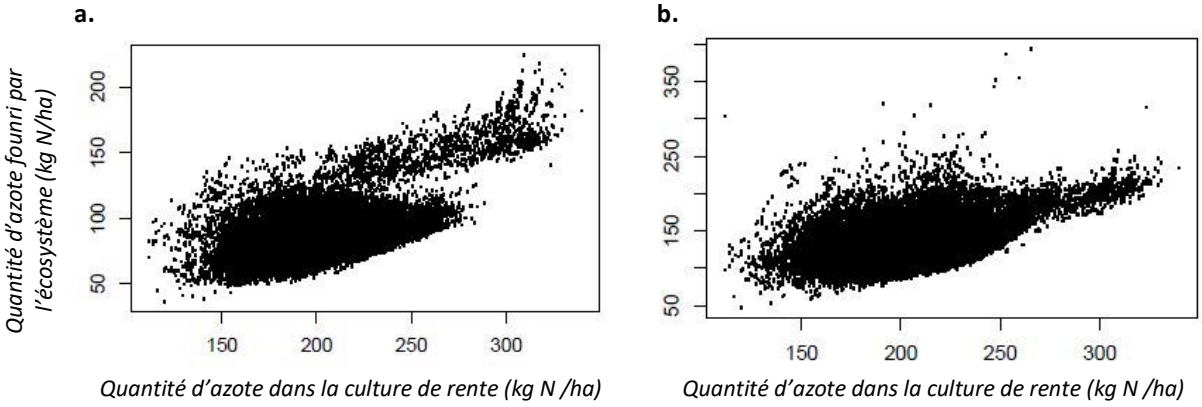
Relations entre azote total dans la plante à la récolte et azote fourni par l'écosystème

La quantité d'azote contenue dans la culture de rente à la récolte est en moyenne de 205 kg/ha, sur l'ensemble des unités de simulation conduites en grande culture. La distribution statistique de cet indicateur ne varie pas en fonction de la teneur en carbone initialement contenue dans le sol (Figure 8-8-12). L'azote dans la plante à la récolte est donc fortement déterminé par la fertilisation. La quantité d'azote contenue dans la culture de rente à la récolte est dépendante néanmoins du type de sol, avec des valeurs de 202 kg/ha en moyenne pour les sols de texture sableuse, limoneuse ou équilibrée et des valeurs de 180 voire 130 kg/ha en moyenne pour les sols de texture argileuse voire très argileuse. La teneur en azote de la culture de rente est d'autant plus élevée que la longueur de la rotation est courte, avec une plus grande variabilité pour les monocultures, à la fois parce que les monocultures peuvent être de nature différente (monocultures d'hiver de type céréales à paille, monocultures de printemps de type maïs, par exemple) -ce qui n'est pas propice à une évaluation moyenne-, mais également parce que ces monocultures reçoivent des fertilisations différenciées, à la fois en terme de quantité, mais également en termes de nature (fertilisation minérale vs fertilisation organique). Enfin, la distribution statistique de la quantité d'azote dans la culture varie en fonction du type de climat, mais, comme pour l'analyse en fonction de la longueur de la rotation, la prise en compte de l'ensemble des systèmes de culture pour l'analyse n'est pas propice à un commentaire général, dans la mesure où climat et systèmes de culture ne sont pas indépendants.

La quantité d'azote contenue dans la culture de rente à la récolte est de l'ordre de 150 à 250 kg N / ha dans la moitié Nord de la France (Figure 8-8-13). Elle est localement faible dans la région climatique dite « Bassin du Sud-Ouest », où la fertilisation moyenne est de faible niveau du fait de faibles apports sur le tournesol revenant fréquemment dans des rotations de type blé-(blé-)tournesol (Figure 8-8-6), et localement élevée dans les Landes ou le long de la Garonne, zones de monoculture de maïs, où la fertilisation est élevée.

La figure 8-8-14 présente les relations entre la quantité d'azote dans la culture à la récolte et la quantité d'azote fournie par l'écosystème, seul ou cumulé avec l'azote dans le sol au moment du semis. On constate qu'en dessous de 200 kg d'N / ha dans la plante à la récolte, il ne semble pas y avoir de relation marquée avec l'azote fourni par l'écosystème. Au-delà de ce seuil, une relation positive entre azote dans la plante et azote dans l'écosystème est plus nettement visible. Elle s'exprime sous la forme de deux ensembles de points, un premier lorsque la quantité d'azote fournie par l'écosystème est comprise entre 50 et environ 120 kg d'N / ha, et un deuxième lorsque la quantité d'azote fourni par l'écosystème dépasse cette valeur. Le même type de phénomène s'observe avec le deuxième indicateur d'azote lié au fonctionnement de l'écosystème mais au-delà d'un seuil 250 kg d'N / ha et suivant une seule tendance. Des analyses complémentaires seraient nécessaires pour expliquer ces phénomènes.

Figure 8-8-14. Quantité d'azote présente dans la culture de rente à la récolte **en fonction de la quantité totale d'azote minéral fournie par l'écosystème** entre le semis et la récolte de la culture de rente (a.), et avec cette quantité cumulée avec la quantité d'azote minéral au semis (b.)



Une analyse par classe de texture du rapport entre la quantité d'azote fournie par l'écosystème pendant le cycle de la culture et la quantité d'azote dans la culture à la récolte montre que **les sols pourvoient, en moyenne, à 40-50% des besoins de la plante** (Figure 8-8-15-a et Figure 8-8-16). La contribution du sol est d'autant plus faible que la teneur en argile du sol est faible. Les zones du centre de la France et du Sud-Est présentent les ratios les plus faibles alors que le Sud-Ouest, l'Alsace et la Bretagne présentent les ratios les plus élevés. Là encore les effets des différentes cultures composants les séquences simulées dans ces régions seraient à analyser plus finement.

Si on prend en compte l'azote minéral présent au semis, la contribution aux besoins de la plante est de l'ordre de 75 %, en moyenne pour tous les types de sol, avec une contribution légèrement plus faible des sols très argileux (lesquels correspondent à des sols dont la teneur en argile est supérieure à 60 % et sont peu utilisés en grandes cultures). Pour certaines simulations, ce ratio est supérieur à 1 : il existerait donc des situations de cultures (certaines séquences de culture dans certains types de sol et certains climats) dans lesquelles en moyenne les besoins en azote des cultures sont couverts par l'azote disponible dans le sol au semis et fourni par l'écosystème pendant le cycle de culture. Les caractéristiques de ces situations restent à identifier.

Enfin, si l'on prend en compte la fertilisation dans le calcul de ce bilan, **le ratio moyen est largement supérieur à 1, et aucune valeur n'est inférieure à 1** : quelle que soit l'unité de simulation (séquence de culture, type de sol, climat), la quantité d'azote moyenne disponible pour la croissance végétale est supérieure aux besoins moyens de la plante. Considérant que les apports d'azote dans le dispositif de simulation correspondent à la médiane des apports recensés dans l'enquête « pratiques agricoles » par région administrative, ces résultats suggèrent qu'à l'échelle du système de culture, en moyenne, une économie de fertilisation (minérale ou organique) serait possible. Ce constat semble cohérent avec le fait que les pratiques de fertilisation des agriculteurs sont majoritairement basées sur la méthode du bilan (partiel ou complet) et donc sur la couverture des besoins de la culture correspondant à un rendement objectif (voir section 10-1) généralement atteint peu fréquemment (ex. 2 années sur 5). Cette analyse est cependant à modérer au regard de deux limites majeures du dispositif de simulation (voir aussi la section « Perspectives de recherche » relative au plan de simulation). D'une part, les dates de semis et de fertilisation sont fixes pour l'ensemble des unités de simulation par région administrative, donc non conditionnées par les types de sol et le climat annuel. De ce fait, il est possible que les dates de semis et apports d'azote soient, certaines années climatiques, non adaptées au climat de l'année et, qu'en conséquence, le développement de la plante ne soit pas représentatif de ce qu'il a été ces années-là. Dans ce type de situation une sous-estimation du développement de la culture engendre une sous-estimation des quantités d'azote acquises. D'autre part, étant donné que le même niveau de fertilisation par culture est constant pour toutes les unités pédoclimatiques au sein d'une région, il est également possible que, ponctuellement, dans des unités de simulation à faible potentiel (zone marginale de culture) le niveau de fertilisation simulé soit surestimé. La fréquence de cette surestimation, a priori faible au sein des régions, reste à précisément estimer.
Pour aller plus loin sur les économies potentielles de fertilisation, une analyse fine des systèmes de cultures concernés par ces ratios supérieurs à 1 reste donc nécessaire, de même qu'une analyse temporelle de l'évolution des flux d'azote au cours de la saison culturale. Il est possible que, annuellement, de l'azote soit présent dans le sol, mais que sa disponibilité ne soit pas synchronisée avec les périodes de besoin de la plante et qu'il soit perdu, par exemple via lixiviation au-delà du volume de sol exploré par les racines.

Figure 8-8-15. Ratio de la quantité d'azote minéral fournie par l'écosystème, sur la quantité d'azote présente dans la culture de rente à la récolte, en fonction de la classe de texture de sol.

Le numérateur du ratio est : (a) la quantité d'azote minéral fourni par l'écosystème **sans** prise en compte de la quantité d'azote minéral dans le sol au moment du semis [Q_{sol-S}] ; (b) la quantité d'azote minéral fourni par l'écosystème avec prise en compte de la quantité d'azote minéral dans le sol au moment du semis [Q_{sol-F}] ; (c) la quantité d'azote minéral fourni par l'écosystème **avec** prise en compte de la quantité d'azote minéral dans le sol au moment du semis et **fertilisation** [Q_{sol-S} + FERTI]

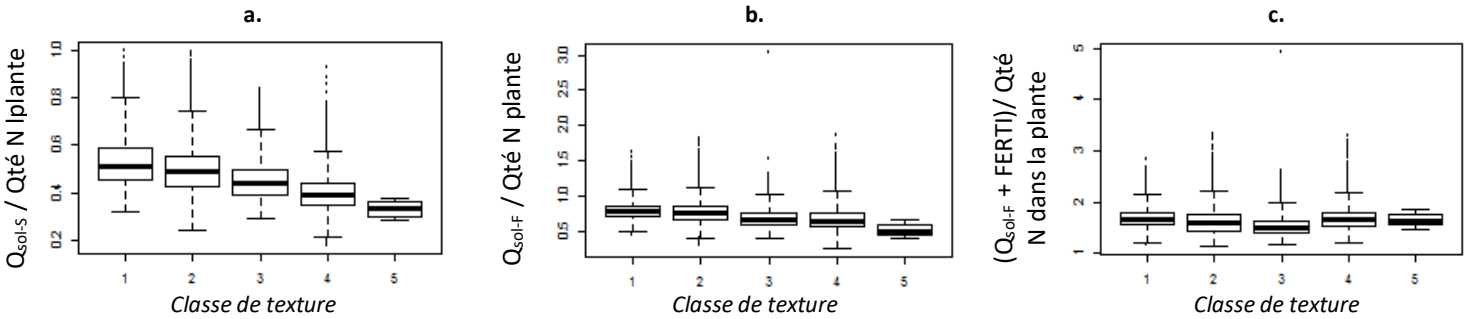
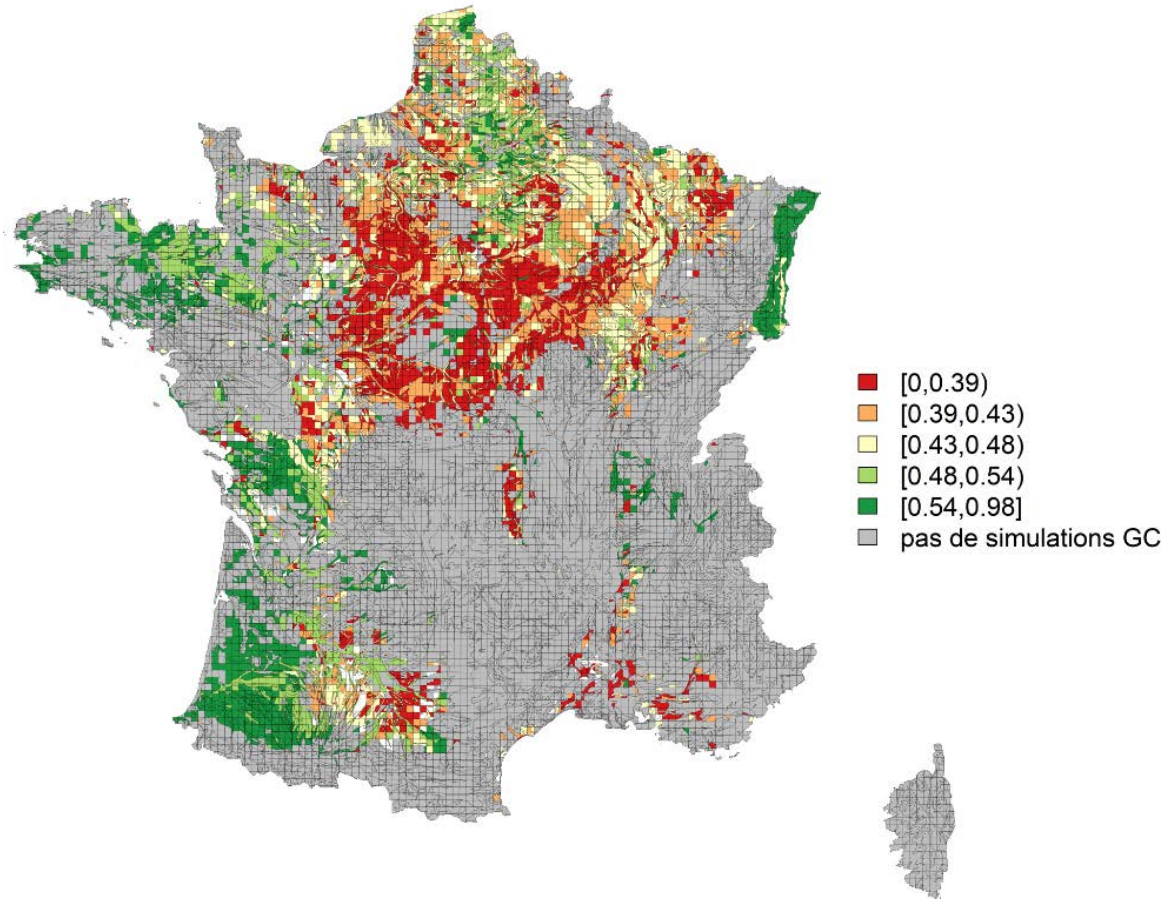


Figure 8-8-16. Carte du **ratio de la quantité d'azote minéral fournie par l'écosystème, sur la quantité d'azote présente dans la culture de rente à la récolte**. On ne tient pas compte de la quantité d'azote minéral dans le sol au moment du semis et on ne tient pas compte de la fertilisation [numérateur du ratio : Q_{sol-S}].

Résolution spatiale : unité pédoclimatique EFESE-écosystèmes agricoles
Les classes de valeurs correspondent à des quintiles.



Influence de la présence de cultures intermédiaires dans la rotation

On compare ici les valeurs de la quantité d'azote dans la plante à la récolte et de la quantité d'azote fournie par l'écosystème pour les systèmes de culture actuels, et pour ces systèmes sans culture intermédiaire, même dans les situations où ils en présentent réellement. Nous souhaitons ainsi discuter des deux hypothèses suivantes :

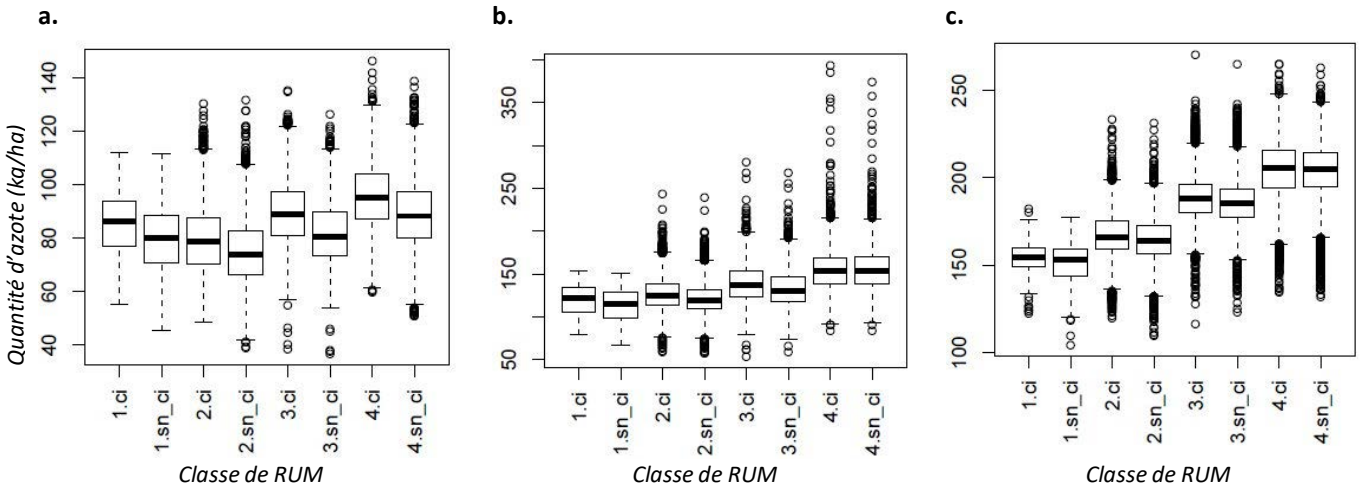
- Sur le service rendu par l'écosystème : la présence de cultures intermédiaires augmente la quantité d'azote disponible dans le sol pendant la croissance de la culture de rente du fait de la limitation des pertes par lixiviation et de la minéralisation des résidus de cultures intermédiaires ;
- Sur la quantité d'azote dans la plante à la récolte : en conséquence du point précédent, la présence de cultures intermédiaires augmente la quantité d'azote dans la culture de rente car la quantité d'azote disponible dans le sol pour cette dernière est plus élevée.

On rappelle que, dans le dispositif de simulation d'EFESE-écosystèmes agricoles, les couverts intermédiaires sont simulés pour les seules unités pédoclimatiques incluses dans une zone vulnérable telle que définie en 2012 dans le cadre de la Directive Nitrate. Ces cultures intermédiaires sont semées et détruites suivant les dates médianes régionales renseignées dans l'enquête pratique culture 2011 (voir Annexe 8-A).

Conformément à notre première hypothèse, la présence d'une culture intermédiaire augmente la quantité d'azote fournie par l'écosystème à la culture de rente. Cet effet est visible en particulier lorsque l'on analyse les résultats au regard de la classe de RUM du sol, pour laquelle la quantité d'azote disponible dans le sol est d'autant plus élevée que la RUM est élevée (Figure 8-8-17a et b). Cet effet reste cependant modéré, dans la mesure où la différence moyenne (toutes valeurs de RUM confondues) est de 5 kg N /ha.
En revanche, notre seconde hypothèse n'est pas validée dans la mesure où la différence de quantité d'azote dans la culture de rente est de l'ordre de 2 kg/ha. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que la quantité d'azote apportée via la fertilisation cumulée à la quantité d'azote fournie par l'écosystème des cultures et la quantité d'azote présente au semis couvre les besoins en azote des cultures et, donc, qu'un apport supplémentaire d'azote n'est pas assimilé par la culture. Il est possible cependant que l'analyse conduite sous forme statistique sur l'ensemble des unités de simulation masque des situations spécifiques où l'on pourrait observer effectivement un effet de la présence de cultures intermédiaires sur la quantité d'azote dans la culture de rente à la récolte.

Figure 8-8-17. Quantité d'azote fournie par l'écosystème (a), quantité d'azote fournie par l'écosystème cumulée à la teneur en azote minéral au semis (b.), quantité d'azote présente dans la culture de rente à la récolte (c.)

Le label « ci » indique que les rotations ont été simulées avec des couvertures intermédiaires avant les cultures de printemps ; le label « sn-ci » indique que les rotations ont été simulées sans couverture intermédiaire.

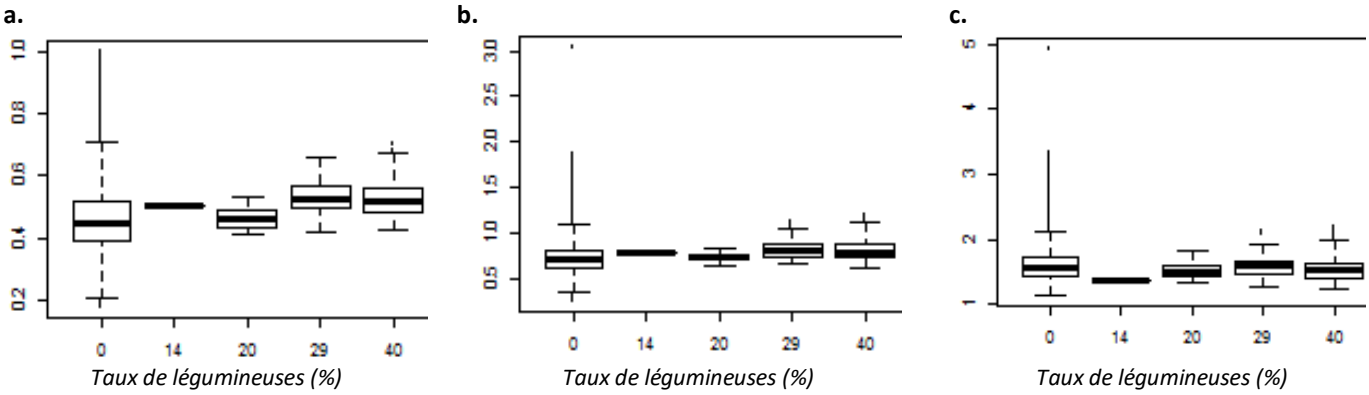


Influence de la présence de légumineuses dans la rotation

Comme nous l'avons précisé précédemment, le nombre d'unités de simulations pour lesquelles des rotations contiennent des légumineuses est faible (Figure 8-8-5). Cependant, sur ces quelques unités, la contribution des légumineuses à la quantité d'azote présente dans la culture de rente à la récolte est significative dès lors que les légumineuses sont fréquences dans la rotation (Figure 8-8-18) : si l'on ne tient pas compte de la quantité d'azote minéral présent au semis), le ratio calculé, de l'ordre de 45 % en moyenne pour des rotations sans légumineuse atteint 55 % pour des taux de légumineuses supérieurs ou égaux à 30 %. En d'autres termes, la présence de légumineuses une année sur trois permet une augmentation moyenne du ratio calculé de l'ordre de 10 %.
En revanche, si l'on considère également la quantité d'azote apportée par la fertilisation, la contribution des légumineuses à la quantité d'azote présente dans la culture à l'échelle du système de culture ne semble pas significative (Figure 8-8-18c).

Figure 8-8-18. Ratio de la quantité d'azote minéral fournie par l'écosystème, sur la quantité d'azote présente dans la culture de rente à la récolte, en fonction de la proportion de légumineuses dans la séquence de cultures.

Le numérateur du ratio est : (a) la quantité d'azote minéral fourni par l'écosystème **sans** prise en compte de la quantité d'azote minéral dans le sol au moment du semis [Q_{sol-S}] ; (b) la quantité d'azote minéral fourni par l'écosystème avec prise en compte de la quantité d'azote minéral dans le sol au moment du semis [Q_{sol-F}] ; (c) la quantité d'azote minéral fourni par l'écosystème **avec** prise en compte de la quantité d'azote minéral dans le sol au moment du semis et **fertilisation** [Q_{sol-S} + FERTI]



8.8.2.4. Discussion et perspectives

Axes de discussion méthodologiques

Limites d'une évaluation des indicateurs par modélisation avec le modèle de culture STICS

Les valeurs de l'indicateur de SE et la valeur de la quantité d'azote dans la plante à la récolte ont été calculées sur chaque unité de simulation par le modèle de culture STICS. Ce choix peut trouver ses limites car l'on pose comme acquis que la paramétrisation des modules de minéralisation et de fixation symbiotique dans le modèle est fiable sur l'ensemble du territoire. Il est cependant possible que certains paramètres de ces modules n'aient pas été évalués dans l'ensemble des contextes agropédoclimatiques. Une analyse de la validité de ces paramètres sur l'ensemble du territoire, assortie éventuellement d'une réévaluation au champ sur la base d'expérimentations serait nécessaire.

Procédures d'analyse sur un enchainement de 30 années de simulation

Pour l'ensemble des SE évalués à l'aide du modèle de culture STICS, nous avons fait le choix d'enchaîner des simulations sur 30 ans, afin de pouvoir prendre en compte, d'une part, les effets des séquences de couverts végétaux (cultures et couverts intermédiaires) et, d'autre part, de la variabilité intra et interannuelle du climat. En ce qui concerne l'évaluation du SE « fourniture d'N minéral aux plantes cultivées », ce protocole de simulation propose une avancée relativement aux études classiques qui sont basées sur des simulations annuelles ou

pluriannuelles dans lesquelles l'état du sol est réinitialisé chaque année. En effet, l'enchainement des simulations proposé dans cette étude permet de bien prendre en compte les effets liés aux précédents de culture – notamment la quantité d'azote apportée par les résidus des précédents- qu'il s'agisse d'une culture de rente ou d'une culture intermédiaire. En revanche, le protocole d'analyse basée sur des calculs de moyennes et d'écart-types de l'ensemble des sorties des simulations pourrait être amélioré. En effet, excepté pour les séquences en monocultures, il associe intrinsèquement des résultats sur des cultures d'hiver et des cultures de printemps : on exacerbe ainsi probablement la variabilité des indicateurs de SE, car la dynamique des processus de minéralisation et fixation symbiotique, fortement liée aux conditions de température et d'humidité, est très influencée par la saisonnalité. Il faudrait donc développer de nouvelles procédures d'analyse statistique des sorties de simulation : d'une part, des procédures qui tiennent compte séparément et spécifiquement des cultures d'hiver et des cultures de printemps, tout en conservant les effets liés aux précédents culturaux ; d'autre part, des procédures qui permettent de hiérarchiser l'effet des séquences de culture de l'effet des successions de culture.

Evaluation de l'indicateur « quantité d'azote fournie par l'écosystème, pendant la période de croissance de la culture de rente »

Dans notre protocole d'analyse, nous utilisons deux indicateurs de SE : l'un ne tient pas compte de la quantité d'azote présente au moment du semis de la culture de rente, l'autre tient compte de cette quantité d'azote. Ces deux expressions sont valides lorsque l'on envisage des évaluations annuelles de la quantité d'azote que peut fournir l'écosystème : la première expression décrit la capacité de l'écosystème à « *produire* » de l'azote assimilable par la culture ; la seconde expression rend compte de la quantité d'azote total que la plante « *peut avoir à sa disposition* » pour sa croissance[10].
Comme expliqué ci-avant, à l'échelle interannuelle, ces deux indicateurs sont dépendants des apports d'azote de la fertilisation. Aussi, il serait nécessaire de poursuivre le développement d'un cadre d'analyse et de méthodologies combinant analyses annuelles et interannuelles pour permettre de caractériser et distinguer les sources d'azote, anthropiques et écosystémiques.

Axes de discussion scientifiques

Indicateur de service vs. indicateur de la quantité d'azote dans la plante à la récolte

Dans cette étude, nous avons utilisé le modèle STICS comme outil d'évaluation des indicateurs. Notre idée initiale était d'évaluer le SE effectif via l'estimation de la quantité d'azote dans la plante par simulation de systèmes de cultures sans fertilisation azotée, « toutes choses égale par ailleurs ». Il s'agissait notamment de conserver des pratiques d'irrigation dans les régions où l'irrigation est pratiquée, notamment pour éviter qu'un stress hydrique trop important génère un stress azoté. Cependant, les résultats ont montré que les quantités d'azote fournies par l'écosystème étaient non représentatives du potentiel de l'état initial – le taux d'azote organique dans le sol-, en raison d'un enchainement des simulations sur 30 ans qui conduisent à des quantités de biomasse restituées au sol très faibles. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi d'analyser les résultats en situation de fertilisation réelle. En conséquence, la quantité d'azote dans la culture de rente a été choisie comme une variable d'analyse des effets des indicateurs de SE, et non comme un indicateur de SE effectif. Dans des protocoles d'évaluation différents et à construire, la « quantité d'azote contenue dans la culture de rente » serait un indicateur du niveau de SE effectif. Les caractéristiques de ce type de protocole sont discutées dans l'Annexe 8-A.

Le rôle des légumineuses

Dans cette étude, nous avons effleuré l'analyse du rôle des légumineuses sur le service « fourniture d'azote minéral aux plantes cultivées » en grandes cultures, car les systèmes de culture simulés contenant des légumineuses dans leurs séquences– définies d'après les pratiques actuelles dominantes d'introduction des légumineuses dans les systèmes de cultures – sont très peu nombreux. De ce fait, une analyse statistique des résultats est délicate. Elle montre cependant que la présence de légumineuses une année sur trois augmente significativement la contribution de l'écosystème à la fourniture d'azote minéral aux plantes.

[10] On notera au passage que ces deux expressions ne sont pas indépendantes, dans la mesure où la quantité d'azote que l'écosystème peut minéraliser ou fixer symbiotiquement dépend de la quantité d'azote présente dans le sol

Néanmoins, l'enjeu reste fort actuellement d'évaluer le rôle des légumineuses dans ce service, et nécessiterait des simulations sur la base de scénarios de séquences de cultures. Il serait alors possible d'introduire des légumineuses non seulement en tant que culture de rente dans la séquence, mais également dans les couverts intermédiaires. De telles simulations permettraient d'évaluer la plus-value de l'introduction de légumineuses non seulement sur le service « fourniture d'azote minéral aux plantes cultivées », mais également pour d'autres services.
Par ailleurs, le protocole de simulation mis en œuvre conduit à maintenir les pratiques de fertilisation à leur niveau réel, ce qui n'est pas sans conséquence sur la quantité d'azote apporté par fixation symbiotique, puisque ce processus n'est pas indépendant de la quantité d'azote présente dans le sol.

Stratégie de fertilisation et aspects dynamiques

De façon générale, les processus mis en jeu dans le SE « fourniture d'azote minéral aux plantes cultivées » que sont la minéralisation et la fixation symbiotique ne sont pas indépendants du niveau d'azote présent dans le sol, y compris l'azote apporté par la fertilisation. L'enjeu principal de l'évaluation de ce SE et la valorisation de son potentiel est donc de proposer des stratégies de fertilisation minimale permettant de maintenir un niveau optimal de biens et de services. Par exemple, des évaluations par modélisation de scénarios de séquences de couverts végétaux, avec des fertilisations occasionnelles, minérales ou organiques, apporteraient des éléments originaux pour concevoir des systèmes de cultures innovants, à bas niveau d'intrants et haut niveau de SE.

Par ailleurs, nous n'avons pas analysé, dans ce chapitre, l'effet du type de fertilisation (fertilisation organique vs fertilisation minérale) bien que les simulations aient été conduites pour ces deux modalités. Ce jeu de données reste à analyser. Il permettrait d'évaluer conjointement le niveau de service, en relation avec le niveau et le type de fertilisation. De façon plus générale, il permettrait d'évaluer des pratiques permettant d'améliorer le niveau organique du sol en maintenant la production de biomasse et l'ensemble des services de régulation.

Enfin, nous avons analysé le SE via l'estimation de moyennes sur trente années de simulation. Considérant que le niveau de SE dépend de la dynamique de la matière organique, il serait nécessaire de développer des procédures qui permettent d'analyser la dynamique du SE, de ses déterminants biophysique et des effets des facteurs exogènes. Ces travaux ouvriraient la voie à ceux sur la résilience des SE aux facteurs exogènes. **Ces propositions sur l'analyse des dynamiques de SE ne sont pas spécifiques au SE analysé ici : ce sont, en fait, des perspectives pour tous les SE instruits dans EFESE-écosystèmes agricoles.**

8.8.3. Evaluation économique du SE

Experts responsables : Maïa David, Vincent Martinet

L'évaluation économique du SE de fourniture d'azote minéral aux plantes cultivées peut être réalisée *via* l'estimation du coût des engrais azotés qu'il serait nécessaire à l'agriculteur d'apporter pour maintenir le niveau de production agricole en l'absence du SE. Pour réaliser l'évaluation économique du niveau effectif de SE, il faut connaître la manière dont le niveau de SE est pris en compte dans le raisonnement des pratiques de fertilisation azotée, autrement dit la manière dont l'agriculteur adapte l'itinéraire de fertilisation azotée lorsqu'il a connaissance des concentrations en azote assimilable par les plantes cultivées dans le sol (donc du niveau du SE). L'évaluation économique du SE effectif va dépendre de l'état de référence du système qui est choisi et des hypothèses retenues sur le comportement des agriculteurs. L'état actuel des connaissances ne permet pas de caractériser les modifications du comportement des agriculteurs en réponse au niveau de fourniture du SE. L'évaluation du SE effectif ne pourrait être réalisée qu'en posant des hypothèses fortes et trop simplificatrices sur ces comportements. En conséquence, il est fait le choix dans EFESE-écosystèmes agricoles de proposer une évaluation économique du potentiel de SE (capacité de l'écosystème). Le niveau potentiel de SE est alors évalué par la valeur des intrants azotés de synthèse qu'il faudrait apporter au système pour pallier l'absence de fourniture du SE. Cette méthode, dite méthode des coûts de remplacement, est largement répandue dans la littérature économique pour évaluer différents types de SE et notamment la fourniture d'azote (Sandhu et al. 2008). Le niveau actuel de fourniture par l'écosystème en azote assimilable par les plantes cultivées est considéré comme référence. L'avantage de cette approche est qu'elle est simple à mettre en place (voir Sandhu et al. 2008

pour la Nouvelle-Zélande). L'inconvénient est qu'elle ne reflète pas la niveau de SE effectif quand le niveau de fourniture du SE potentiel est significativement plus élevé que celui du SE effectif[11].

A noter que cette approche peut aussi induire une surévaluation des bénéfices environnementaux liés à une augmentation de la fourniture du SE. En effet, si l'agriculteur ne prend pas en compte le niveau de SE dans son choix d'apport, plus le niveau de SE est élevé et plus la quantité d'éléments minéraux non absorbés sera élevée, augmentant les impacts environnementaux négatifs potentiels.

Les simulations conduites dans le cadre de l'étude EFESE-écosystèmes agricoles avec le modèle STICS ont permis d'estimer les quantités d'azote fournies par l'écosystème aux cultures (en kg d'azote/ha/an). L'évaluation économique du SE fourni consiste alors à multiplier ces quantités par le prix de marché de l'azote en France (en euros par tonne d'azote).

Sandhu *et al.* (2008) appliquent une méthode similaire pour évaluer le SE de minéralisation de l'azote fourni par des écosystèmes agricoles en agriculture conventionnelle vs. agriculture biologique en Nouvelle-Zélande. Grâce à des expérimentations sur parcelles, ils déterminent des taux de conversion entre matière organique et quantité totale d'azote minéralisée. Puis ils calculent la valeur économique du SE rendu en multipliant cette valeur par un prix de l'azote à 0.84 USD /kg.

8.8.3.2. Stratégie retenue pour l'évaluation économique du SE

L'évaluation économique suivant la méthode des coûts de remplacement du SE « Fourniture d'azote minéral aux plantes cultivées » est basée sur la logique générale suivante :
Valeur économique de la quantité d'azote assimilable fournie par l'écosystème aux plantes cultivées pour un espace géographique donné (euros/an) = quantité moyenne annuelle d'azote fournie par l'écosystème (en kgN/ha/an) x coût moyen de l'azote (en euro/kgN) x surfaces des cultures (ha).

Par la suite nous considérons seulement la quantité d'azote fournie par l'écosystème pendant le cycle de la culture de rente, sans prise en compte de la quantité d'azote au semis, considérant que cette dernière est très largement dépendante des apports d'azote par fertilisation sur le cycle précédent.

Aussi, l'évaluation économique a été réalisée en quatre grandes étapes :

(i) estimation d'une quantité moyenne annuelle d'azote fournie par l'écosystème pendant le cycle de la culture de rente par ha (kgN/ha/an) par unité pédoclimatique *via* une procédure de changement d'échelle prenant en compte le poids relatif des simulations dans l'UPC (CF. Annexe 8-A) ;

(ii) estimation d'une quantité moyenne annuelle d'azote fournie par l'écosystème (kgN/an) par UPC *via* la multiplication des résultats de la première étape par les surfaces correspondantes de culture par UPC. Dans cette procédure, pour chaque culture simulée, la quantité d'azote moyenne estimée en étape (i) est extrapolée à l'ensemble de la surface de cette culture de l'UPC. Les surfaces utilisées ici correspondent à la surface totale moyenne par culture sur 2010-2012 dans l'UPC (moyenne des surfaces des RPG annuels) ;

(iii) estimation d'une quantité moyenne annuelle d'azote fournie par l'écosystème par culture (kgN/an) pour la France métropolitaine. Dans cette procédure, pour chaque culture simulée (Cf. tableau 8-8-1), la quantité moyenne annuelle d'azote fournie par l'écosystème (kgN) estimée dans l'étape précédente est extrapolée, proportionnellement, à l'ensemble de la surface de la culture en France c.-à-d. aux surfaces non comprises dans les UPC simulées. Les surfaces utilisées ici correspondent à la surface totale moyenne sur 2010-2012, France entière, par culture (moyenne des surfaces des RPG annuels). La surface totale d'extrapolation considérée ici est de 13 506 227 d'ha alors que la surface RPG moyenne de grandes cultures (y c. de cultures industrielles) France entière sur 2010-2012 est de 14 811 520 ha. La surface considérée dans cette évaluation économique correspond donc à plus de 91% de la surface moyenne sur 2010-2012 de grandes cultures en France métropolitaine ;

[11] Cette approche permettrait d'évaluer le niveau effectif de SE si l'on considère que l'agriculteur a initialement un apport d'azote optimal et que la réponse du rendement à l'azote est concave. Il est alors optimal pour l'agriculteur de compenser toute diminution de la fourniture du SE, dans la mesure où l'on ne considère pas les usages des sols alternatifs (ce qui sera le cas pour une variation marginale du niveau de SE).

(iv) estimation des coûts associés (€/an) aux quantités moyennes annuelles d'azote estimées dans les étapes (ii) et (iii). Pour cela, un coût moyen du kg d'N de 0,85 € a été utilisé conformément au coût utilisé dans Pellerin *et al.*, 2013.

8.8.3.3. Analyse des résultats

Les résultats de l'évaluation économique sont présentés dans le tableau 8-8-1. Ils doivent être analysés avec précaution. Ils correspondent à un premier ordre de grandeur du coût de remplacement du SE « Fourniture d'azote minéral aux plantes cultivées » pour les surfaces d'écosystèmes agricoles couvertes par les principales grandes cultures en France et la betterave sucrière. Ils sont d'autant plus incertains que la surface RPG d'une culture dans les UPCs simulés est faible relativement à la surface totale de cette culture en France. En effet, la qualité de l'extrapolation dépend de la représentativité du jeu de données issues des simulations relativement à l'ensemble des surfaces de culture. Ainsi, l'évaluation sur les surfaces totales de pois de printemps et de maïs fourrage est particulièrement incertaine puisque les surfaces de ces cultures dans les UPC simulées représentent une part minoritaire de la surface totale de celles-ci, respectivement 19% et 31% des surfaces totales. Les évaluations pour le maïs grain et le tournesol sont elles aussi à analyser au regard de la représentativité des surfaces simulées (53% des surfaces totales pour ces deux cultures). Ces faibles représentativités sont liées au fait que ces cultures sont faiblement représentées dans les séquences dominantes (en terme de surface) par UPC qui ont été simulées avec STICS dans EFESE-écosystèmes agricoles.

Le coût de remplacement total du SE « fourniture d'azote minéral aux plantes cultivées » ne peut être calculé car il correspondrait au cas extrême (et irréaliste) où tout l'azote devrait être apporté, avec la limite que le présent calcul est réalisé « toutes choses égales par ailleurs », à un prix de l'azote donné. Or le calcul ne prend pas en compte les effets prix d'une telle hausse de la demande d'azote minéral.

8.8.3.4. Perspectives de recherche

Plusieurs pistes d'amélioration de la qualité de l'évaluation économiques sont envisageables.

La simulation d'un plus grand nombre de séquences dans un plus grand nombre d'UPC permettrait d'améliorer la représentativité des estimations biophysiques et donc de l'évaluation économique. Cette amplification des simulations pourrait être orientée de manière à mieux couvrir les surfaces des cultures faiblement représentées dans le plan de simulation actuel.

Enfin, la méthode d'évaluation du SE fourniture d'azote par l'écosystème proposée ici estime une borne supérieure de la valeur monétaire du SE en supposant que l'agriculteur compense exactement la quantité d'azote qui n'est plus fournie par l'écosystème. Dans des travaux futurs, une prise en compte plus fine du comportement de l'agriculteur serait souhaitable en tenant compte des mesures effectuées (ou non) par celui-ci sur les besoins en apports d'azote. Dans le cas extrême où aucune mesure n'est faite avant l'apport anthropique (i.e. le niveau fourni par l'écosystème n'affecte pas la quantité apportée par l'agriculteur) et qu'on a un excès d'azote engendrant des pollutions, l'absence du SE de fourniture d'azote par l'écosystème peut avoir des conséquences positives en réduisant ces pollutions.

Tableau 8-8-1. Évaluation économique du SE « Fourniture en azote assimilable par les plantes cultivées ».

La quantité moyenne d'azote fournie par l'écosystème sur le cycle de la culture de rente est donnée à titre indicatif par type de culture. Voir explication de la procédure de calcul dans la section 8.8.3.2.
Les chiffres présentés dans ce tableau fournissent des premiers ordres de grandeur qu'il faut analyser au regard des hypothèses et des méthodes d'évaluation mobilisées.

Culture :	**Quantité moyenne d'azote fourni par l'écosystème** (kg N/ha/an)	**Surface "UPC" de la culture** = surface occupée par la culture dans les UPC où elle est simulée (ha ; moyenne 2010-12)	**Coût de la fertilisation azotée minérale de la culture dans l'ensemble des UPC où elle est simulée** (M€/an)	**Surface totale de la culture** = surface occupée par la culture à l'échelle France entière (ha ; moyenne 2010-12, extrapolation)	**Coût de la fertilisation azotée minérale de la culture à l'échelle France entière** (M€/an)	***Représentativité des surfaces prises en compte dans le dispositif de simulation*** *= surface "UPC" / surface totale*
Betterave sucrière	121	302 335	31	437 165	45	*69 %*
Blé tendre	74	3 958 377	243	6 006 826	369	*66 %*
Orge	74	1 119 855	71	1 548 366	98	*72 %*
Colza	90	1 083 475	82	1 590 907	120	*68 %*
Maïs fourrage	95	385 833	32	1 264 859	105	*31 %*
Maïs grain	131	867 926	101	1 643 784	191	*53 %*
Pois de printemps	170	56 117	8	291 370	43	*19 %*
Tournesol	78	383 282	23	722 950	43	*53 %*