

# Évaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFESE

Anaïs Tibi, Olivier Therond

▶ **To cite this version:**

Anaïs Tibi, Olivier Therond. Évaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFESE. [0] INRA. 2017, 12 p. hal-02990793

**HAL Id: hal-02990793**
**https://hal.inrae.fr/hal-02990793**

Submitted on 5 Nov 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.



# LES SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES RENDUS PAR LES ÉCOSYSTEMES AGRICOLES

## UNE CONTRIBUTION AU PROGRAMME EFESE

RÉSUMÉ DE L'ÉTUDE RÉALISÉE PAR L'INRA - NOVEMBRE 2017

INRA
SCIENCE & IMPACT

*Si la notion de "service rendu par la nature" est utilisée depuis la deuxième moitié du XIX^e^ siècle, le terme a réellement été introduit en 1970 dans les écrits scientifiques, et le concept a été popularisé au début des années 2000 par l'Évaluation des écosystèmes pour le millénaire (*Millennium Ecosystem Assessment – *MEA), dont l'objectif était d'évaluer, sur des fondements scientifiques, l'ampleur et les conséquences des modifications subies par les écosystèmes dont dépendent la survie et le bien-être humain.*

*En France, l'Evaluation Française des Ecosystèmes et des Services Ecosystémiques (EFESE[1]) vise à construire des outils d'évaluation des services écosystémiques (SE) pour sensibiliser la société aux valeurs de la biodiversité et éclairer les processus de planification nationaux et locaux. Ce programme poursuit également l'objectif d'intégrer les valeurs de la biodiversité dans les systèmes de comptabilité nationale. Dans ce contexte, le ministère en charge de l'Environnement a sollicité l'Inra pour contribuer au volet "écosystèmes agricoles" de l'EFESE. Cette étude, conduite selon les principes résumés dans l'Encadré 3 (p. 11), est conjointement soutenue par le programme fédérateur de recherche conduit par l'Inra sur les services rendus par les écosystèmes[2]. L'objectif de la présente étude est de décrire les mécanismes et les déterminants d'une gamme de SE, puis de procéder à leur évaluation biophysique et économique à l'échelle nationale à l'aide d'indicateurs également définis dans le cadre de l'étude. Un système d'information pérenne pour l'évaluation des écosystèmes agricoles et des SE associés, rassemblant l'ensemble des données produites et mises à disposition de la communauté scientifique, constitue également l'une des sorties de ce travail.*

*L'étude met d'abord en évidence la nécessité d'analyser finement les mécanismes biophysiques qui sous-tendent la fourniture des SE avant d'envisager l'évaluation de ces derniers. En distinguant, parmi l'ensemble des SE rendus par ces écosystèmes à la société, ceux rendus spécifiquement aux agriculteurs car contribuant à la production de biens agricoles, elle propose également une première évaluation du poids de ces SE relativement à celui des intrants. Enfin, elle souligne la prudence avec laquelle doivent être utilisées les évaluations économiques des SE.*

## Un cadre d'analyse des services écosystémiques adapté aux écosystèmes anthropisés

Du point de vue des écologues comme de celui des agronomes, **le terme "écosystème agricole" désigne le système "sol-plante" de la parcelle**, incluant les êtres vivants qui y circulent (animaux d'élevage au pâturage, biodiversité animale sauvage), et les éléments semi-naturels (haies, arbres isolés, mares, bords de parcelle…). Du point de vue géographique, les écosystèmes agricoles correspondent à l'ensemble des parcelles cultivées ou en herbe exploitées majoritairement pour l'agriculture. L'agriculteur agit sur cet écosystème au moyen de pratiques dans le but principal de produire de la biomasse[1]. L'un des enjeux associés à l'analyse des SE rendus par ces écosystèmes est la conception de systèmes de production reposant davantage sur les SE, moins consommateurs en intrants exogènes et répondant aux enjeux de société (conservation de la biodiversité, limitation des impacts environnementaux, etc.). Pour être opérationnel et servir cet objectif, le cadre d'analyse des SE rendus par les écosystèmes agricoles doit donc permettre de clarifier le statut et de spécifier les rôles respectifs des SE – liés au fonctionnement du système "sol-plantes-animaux" et du paysage – et des pratiques dans la production agricole.

De nombreux cadres d'analyse des SE reposent sur l'explicitation d'une chaîne, ou cascade, reliant le fonctionnement d'un écosystème au bien-être de bénéficiaires humains en articulant les notions de structure et processus biophysiques de l'écosystème, de SE et d'avantage. Deux grands types de définition du concept de SE coexistent dans la littérature scientifique : (i) celle dans laquelle les SE sont des composantes biophysiques de l'écosystème dont sont dérivés des avantages, retenue par les auteurs de la *Common international classification for ecosystem services* (CICES) et (ii) celle dans laquelle les SE sont les avantages tirés par l'Homme des écosystèmes, retenue dans le rapport du *Millennium ecosystem assessment* – MEA). En cohérence avec la CICES, **les SE sont définis ici comme les processus écologiques ou les éléments de la structure de l'écosystème dont l'Homme dérive des avantages, parfois en mobilisant du travail, du capital matériel ou cognitif, dans le but d'améliorer son bien-être.** Les avantages retirés des SE, déconnectés de l'écosystème sur le plan fonctionnel, peuvent être matériels (des biens) ou immatériels (des services[4]). Un SE peut être à l'origine de plusieurs avantages.

Cette conceptualisation repose sur la distinction entre, d'une part, les **déterminants biophysiques** des SE, endogènes à l'écosystème et qui sous-tendent la fourniture des SE, et, d'autre part, les **facteurs exogènes** à l'écosystème qui viennent moduler l'expression du niveau des SE et de la production agricole (Figure 1 p. 4). Dans le cas des écosystèmes agricoles, **le statut des pratiques agricoles diffère suivant leur nature**. Dans la mesure où elles définissent la nature de l'écosystème agricole, les **pratiques de configuration de l'écosystème** (choix des génotypes végétaux et animaux, des séquences de culture, etc.) déterminent la nature et le potentiel de la production pour un climat donné. La configuration de l'écosystème est un déterminant biophysique clef du niveau de fourniture des SE. Les **pratiques de gestion de la biomasse** sont considérées comme des facteurs exogènes anthropiques lorsqu'elles modulent le niveau de fourniture des SE : elles interviennent *via* leur action historique sur l'état de l'écosystème (ex. effets des pratiques de travail du sol sur le taux de matière organique, sa distribution dans le sol, etc.), ou *via* leur action sur l'expression du SE dans la période considérée pour son évaluation (ex. irrigation qui, *via* son effet sur les flux d'eau, modifie le niveau des SE qui en dépendent en cours d'année).

Cette conceptualisation offre la possibilité d'**analyser le potentiel de SE délivré par une configuration spatiale et temporelle d'écosystème donnée, et la façon dont les pratiques agricoles exogènes amplifient ou réduisent ce potentiel**. Pour autant, elle ne conduit pas l'agronome à changer de posture d'analyse et de conception : c'est bien une combinaison cohérente entre une configuration de couverts végétaux et les pratiques agricoles de gestion de ceux-ci, autrement dit un système de culture, qui peut permettre d'atteindre des objectifs en termes de production agricole, de réduction des intrants exogènes, et de fourniture de SE à la société.

[1] Le terme "agroécosystème" désigne l'ensemble formé par l'écosystème agricole (compartiment écologique) et les personnes qui y interviennent (ainsi que les moyens qu'elles mettent en œuvre).

[2] https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/levaluation-francaise-des-ecosystemes-et-des-services-ecosystemiques

[3] http://www.ecoserv.inra.fr/

[4] Les termes *biens* et *services* sont ici utilisés au sens de la comptabilité nationale, et désignent l'ensemble des produits fabriqués ou délivrés par les entreprises, les administrations publiques et privées, etc.

Par ailleurs, **seuls les processus liés au vivant sont définis comme des SE**. En corollaire, **la biodiversité des écosystèmes agricoles est considérée comme un déterminant biophysique des SE**. Deux composantes de la biodiversité interagissent au sein des écosystèmes agricoles : la biodiversité dite "planifiée", intentionnellement introduite dans l'écosystème et prélevée, tout ou partie, à des fins de production agricole (plantes cultivées et animaux d'élevage), et la biodiversité "associée", qui inclut la flore adventice, la faune du sol (macro- et méso-faune endogée, communautés microbiennes du sol), et la macro- et méso-faune épigée et aérienne qui circule dans la parcelle et son environnement.

Dans une optique d'aide à la décision publique et du fait du focus thématique de cette étude, **deux catégories de bénéficiaires des SE ont été distinguées : les agriculteurs et la société dans son ensemble**. En tant que gestionnaires de l'écosystème agricole, les agriculteurs dérivent de certains SE des avantages spécifiques qui contribuent directement à la production agricole. La société est bénéficiaire des SE rendus par les écosystèmes agricoles, soit de façon directe (ex. SE de régulation du climat global), soit de façon indirecte du fait d'une modification du comportement du bénéficiaire "agriculteur" (ex. SE de "régulation des graines d'adventices" se substituant à l'usage d'herbicides susceptibles de contaminer l'environnement). Notons qu'en tant que citoyens, les agriculteurs appartiennent également à la deuxième catégorie de bénéficiaires, la société.

Enfin, **les "disservices" n'ont pas été examinés dans le cadre de cette étude**. Le concept de disservice peut recouvrir deux notions distinctes : (1) les effets négatifs de la biodiversité ou de certains processus des écosystèmes sur l'Homme (à distinguer d'une situation de bas niveau de SE), et (2) les impacts négatifs des activités humaines sur l'environnement, correspondant essentiellement à des flux de matière, depuis les écosystèmes agricoles vers les autres écosystèmes, liés aux pratiques agricoles.

## Démarche adoptée dans l'étude

En cohérence avec de nombreux travaux internationaux et le programme EFESE, **la classification des SE proposée par la CICES a été utilisée comme typologie de référence** pour identifier les SE rendus par les écosystèmes agricoles français. Le concept de "SE d'approvisionnement" n'a néanmoins pas été retenu car **la production agricole est considérée dans l'étude comme un bien agricole**, autrement dit un avantage dérivé par l'agriculteur des interactions entre SE de régulation et intrants anthropiques. **Quatorze SE ont ainsi été instruits par le collectif d'experts**. Pour chacun d'entre eux ont été précisés : (i) la nature du SE ; (ii) les avantages dérivés par les bénéficiaires "agriculteur" et "société" ; (iii) les principaux déterminants biophysiques et facteurs exogènes impliqués dans la fourniture du SE. Ce travail de spécification a conduit à proposer une révision de la typologie CICES.

Une revue de la littérature scientifique et des travaux européens sur l'évaluation des SE a permis d'identifier les méthodologies (indicateurs, données) visant à quantifier le niveau de fourniture de chaque SE, voire d'en proposer de nouvelles. Ces méthodes doivent permettre de **cartographier les SE rendus par les écosystèmes agricoles (i) à la résolution spatiale la plus fine possible, (ii) à l'échelle de la France entière et (iii) considérant l'état actuel de ces écosystèmes**. Selon le (groupe de) SE considéré(s), la résolution spatiale d'évaluation va de l'ilot cultural à la Petite région agricole (PRA), voire à celle du département pour certains. Le tableau 1 présente la liste finale des SE examinés.

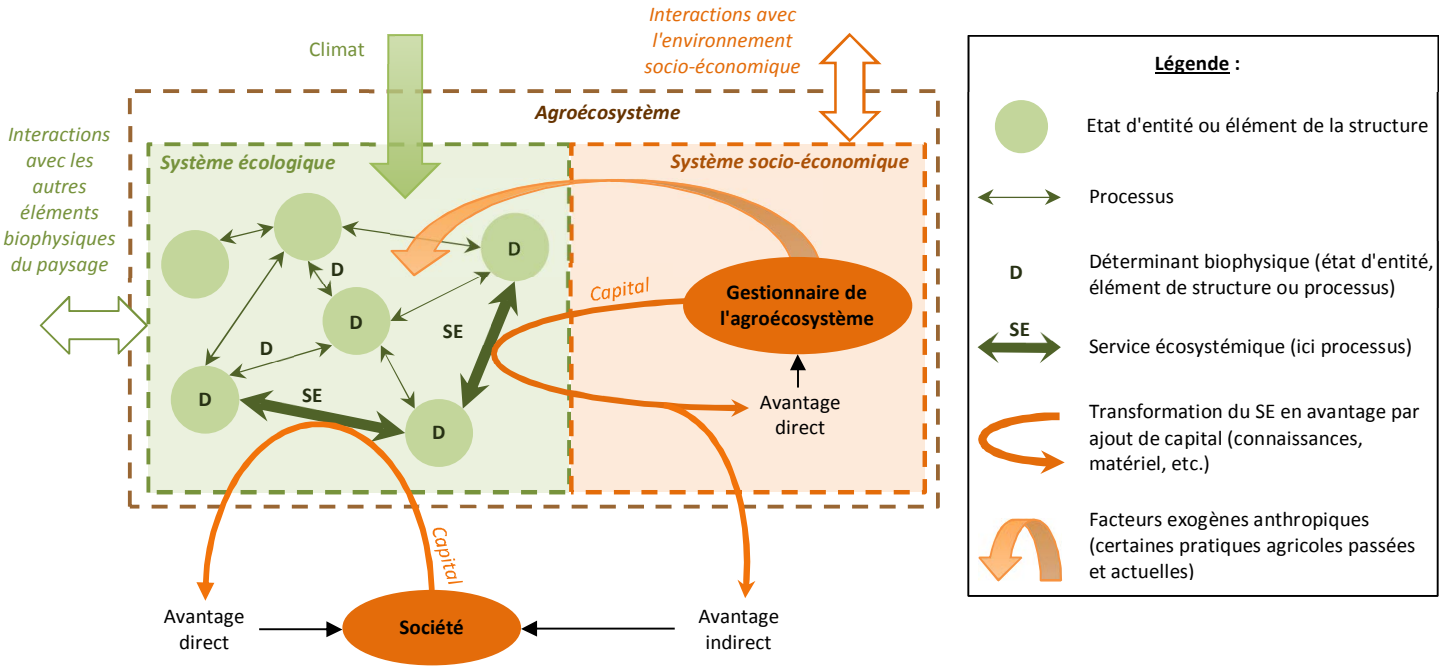
Compte tenu des contraintes relatives aux modalités de l'étude (disponibilité des données, durée du projet, compétences disciplinaires et techniques au sein du collectif d'experts, etc.), certains SE n'ont pas été quantifiés. Pour ces SE, un état de l'art de la littérature disponible a néanmoins été réalisé afin d'identifier les enjeux méthodologiques de leur évaluation et les besoins de travaux et de données complémentaires qui permettraient de la réaliser. Certains SE n'ont par ailleurs pu être quantifiés que pour certains types d'écosystèmes agricoles. Il en résulte que **l'assiette de l'évaluation n'est pas la même pour tous les SE quantifiés**. Enfin, les écosystèmes de cultures permanentes, exploités pour le maraîchage et/ou situés Outre-Mer, n'ont, sauf exception, pas été traités faute de données permettant de les caractériser de manière suffisamment précise.

**Tableau 1.** Liste des SE instruits dans l'étude et nature du travail réalisé par le collectif d'experts

La société dans son ensemble bénéficie indirectement de certains SE du fait de la modification du comportement de l'agriculteur (pratiques) lorsque ce dernier bénéficie directement de ces SE.

| Service écosystémique | Bénéficiaire direct *(bénéficiaire indirect)* | Nature de l'analyse réalisée | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Spécification | Quantification biophysique | Evaluation économique |
| Structuration du sol | Agriculteur | | | |
| Fourniture d'N minéral aux plantes cultivées | Agriculteur *(→Société)* | | | |
| Fourniture d'autres nutriments aux plantes cultivées | | | | |
| Stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées | Agriculteur *(→Société)* | | | |
| Stabilisation des sols et contrôle de l'érosion | Agriculteur et Société | | | instruite |
| Pollinisation des espèces cultivées | Agriculteur | | | |
| Régulation des graines d'adventices | Agriculteur *(→Société)* | | partielle | instruite |
| Régulation des insectes ravageurs | Agriculteur *(→Société)* | | partielle | instruite |
| Atténuation naturelle des pesticides par les sols | Société | | | |
| Régulation de la qualité de l'eau vis-à-vis du N, du P et du COD | Société | | partielle | instruite |
| Stockage et restitution de l'eau bleue | Société | | | |
| Régulation du climat global par atténuation des GES et stockage de C | Société | | | instruite |
| Potentiel récréatif (activités de plein air sans prélèvement) | Société | | | |
| Potentiel récréatif (activités de plein air avec prélèvement) | Société | | | |

**Figure 1**. Représentation des concepts clefs manipulés dans l'étude, appliqués à la fourniture de deux SE : l'un rendu directement à la société, l'autre rendu directement au gestionnaire de l'agroécosystème et dont la société dérive un avantage indirect.




Système écologique ("écosystème agricole") : ensemble des composants biotiques et abiotiques compris ou circulant dans son emprise géographique (hors bâti).
Système socio-économique : personnes (agriculteurs) et moyens artificiels mis en œuvre pour configurer et gérer le système écologique dans la finalité principale de produire de la biomasse.

*Exemple : le **SE de "pollinisation des espèces cultivées"** correspond au processus de transfert de grains de pollen entre les fleurs mâles et femelles. Les caractéristiques des communautés de pollinisateurs (structure, abondance) constituent un des déterminants biophysiques clefs de ce SE. Le climat, et l'emploi de pesticides sont deux des facteurs exogènes qui en modulent l'expression.*

## Encadré 1. L'utilisation de modèles de simulation dynamique du système sol-plantes(-animaux) pour évaluer les SE liés aux cycles du carbone, de l'azote et de l'eau

**• Objectifs**

Pour évaluer les SE en lien avec le cycle de l'eau, de l'azote et du carbone, deux modèles de simulation dynamique du système sol-plante-(animaux) développés par l'Inra ont été employés, STICS[5] et PaSim[6]. Ces modèles simulent la croissance et le développement du couvert et les composantes des bilans hydrique, azoté et carbone respectivement pour les systèmes de culture (sol-grandes cultures) et les systèmes toujours en herbe (sol-prairies-animaux pâturant). **Un plan de simulation a été conçu spécifiquement pour cette étude**. En raison des contraintes inhérentes à l'étude, **seuls les résultats obtenus sur huit cultures-types avec le modèle STICS ont pu être exploités.** La mise en œuvre du modèle PaSim et le traitement des résultats relatifs aux prairies constitue l'un des prolongements de l'étude.

L'utilisation des simulations dynamiques vise à estimer le niveau annuel moyen de SE fourni par les **systèmes dominants en termes de surface en France actuellement**. L'unité fonctionnelle d'évaluation considérée n'est pas le couvert annuel mais bien la rotation de cultures, ce qui permet de prendre en compte les effets pluriannuels ("effet précédent" et cumulatifs) des configurations temporelles de couverts végétaux et des pratiques exogènes sur le niveau moyen des SE évalués.

Un des atouts de ce type de simulations est de prendre en compte la dynamique journalière des interactions entre apports d'intrants et processus écologiques. En revanche, ces modèles ne simulant pas les effets des bioagresseurs et des pratiques phytosanitaires, seuls les processus relatifs aux cycles abiotiques sont considérés.

**• Paramètres d'entrée des modèles et jeux de simulation**

Les simulations ont été réalisées sur des unités de surface considérées homogènes en termes de sol et de climat, ou "unités pédoclimatiques" (UPC). 23 149 UPC ayant au moins 100 ha de surface agricole ont été considérées dans l'étude. Les paramètres d'entrées des modèles ont été définis pour ces UPC à l'aide de différentes bases de données.

Le dispositif de simulation ainsi élaboré a permis de **simuler la dynamique des "systèmes actuels"**, considérant les pratiques dominantes actuelles en termes de fertilisation (minérale et organique), de mode d'exportation de la biomasse (grains, pailles), d'enfouissement des résidus de culture, d'irrigation (pour le maïs) et d'implantation de couverts intermédiaires. Plusieurs **jeux de simulation alternatifs** ont également été construits afin de tester l'effet de certaines pratiques sur le niveau de fourniture des SE (autres pratiques inchangées par rapport aux simulations "systèmes actuels") : simulations alternatives sans irrigation du maïs, sans fertilisation azotée, sans couverts intermédiaires dans les UPC situées en Zone Vulnérable. Après analyse de la cohérence des résultats de simulation en termes de rendements et de quantité de biomasse aérienne annuels à la récolte, **30 580 simulations** (combinaisons [type de pédoclimat X système de culture]) **ont été conservées pour les analyses**.

[5] https://www6.paca.inra.fr/stics/Qui-sommes-nous/Presentation-du-modele-Stics
[6] https://www1.clermont.inra.fr/urep/modeles/pasim_FR.htm

## Les SE "intrants" rendus à l'agriculteur

La principale finalité de l'écosystème agricole est de produire des biens végétaux (production primaire) et animaux (production secondaire, élaborée à partir de la production végétale). Au cours du cycle de production (cycle cultural), un certain nombre de SE interviennent dans l'élaboration du rendement en agissant sur le niveau d'expression des facteurs qui le pénalisent (manque d'eau, carences en nutriments, déficit de pollinisation, dommages causés par les bioagresseurs). Ces SE de régulation qui déterminent la production végétale peuvent être considérés comme des facteurs de production tout comme les intrants exogènes (eau d'irrigation, engrais de synthèse, produits phytosanitaires, etc.). En tant que gestionnaire de l'écosystème agricole, l'agriculteur est le bénéficiaire direct de ces SE dits "intrants". Du fait de leur substitution à l'usage d'intrants de synthèse, certains de ces SE contribuent à la réduction des pollutions environnementales, ce qui constitue un avantage indirect pour la société dans son ensemble.

### L'évaluation du niveau absolu des SE "intrants"

Les SE "intrants" se répartissent en deux grands types selon leur rôle dans l'élaboration du rendement végétal.

(i) **Les SE qui régulent les stress abiotiques** fournissent au couvert végétal (prairie ou culture) les conditions propices à la croissance racinaire, et limitent le déficit hydrique et les carences en éléments nutritifs : SE de "**structuration du sol**", de "**fourniture de nutriments aux plantes cultivées**", de "**stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées**", et de "**stabilisation des sols et contrôle de l'érosion**". Ces SE reposent fortement sur les composantes biotiques et abiotiques du "sol" – faune du sol, systèmes aérien et racinaire des plantes, taux de matière organique, réserve utile en eau, etc. –, avec un rôle central du SE "structuration du sol" qui détermine lui-même les autres SE.

Les SE en lien avec le cycle de l'eau, de l'azote (N) et du carbone (C) ont été évalués *via* le dispositif de simulation dynamique du système sol-plante présenté dans l'Encadré 1.

La quantification des SE de "fourniture d'N minéral", de "stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées" et de "stabilisation des sols et contrôle de l'érosion" met en évidence, outre le rôle important du climat, celui de la nature de la séquence de culture, notamment la saisonnalité du cycle de culture (printemps *versus* hiver) et l'implantation ou non d'un couvert pendant l'inter-culture. Les indicateurs permettent d'estimer le niveau absolu des SE et d'en observer la distribution spatiale, mais pas de qualifier les gammes de valeurs en termes de niveau "faible" ou "fort" de SE. Pour éclairer la prise de décision des bénéficiaires des SE, **il est nécessaire d'évaluer dans quelle mesure l'écosystème répond aux besoins des cultures, notamment en N minéral et en eau, compte tenu du contexte pédoclimatique dans lequel ces SE s'expriment**. Autrement dit, ces indicateurs doivent être retravaillés de sorte à exprimer le niveau de fourniture de ces SE relativement aux enjeux de production agricole (*cf. infra*).

(ii) Les **SE qui régulent les stress biotiques** protègent le rendement en limitant les pertes dues à un déficit de pollinisation ou à l'action de bioagresseurs : SE de "**pollinisation des espèces cultivées**", de "**régulation des graines d'adventices**" et de "**régulation des insectes ravageurs**". Le niveau de ces SE est fortement déterminé par la biodiversité animale "associée". Ces SE dépendent donc à la fois de l'écosystème agricole au sens strict (parcelle) mais aussi des caractéristiques du paysage qui déterminent la dynamique de cette biodiversité.

Le niveau de fourniture du SE de "**pollinisation des espèces cultivées**" est principalement expliqué par la composition et la configuration du paysage et le climat. Bien que ce SE soit l'un des plus étudiés dans la littérature, il n'existe actuellement pas d'indicateur direct de son niveau de fourniture. Un nouvel indicateur visant à estimer l'effet de la pollinisation sur la production agricole tend à montrer que celle-ci serait un facteur limitant du rendement des cultures dépendantes de ce SE dans plusieurs régions de France.

En l'absence de données françaises permettant d'évaluer le niveau de fourniture des SE de **régulation des bioagresseurs** à l'échelle de la France entière (ex. mesures de taux de prédation ou de parasitisme, de pertes de rendement), seuls quelques exemples d'estimations du potentiel de SE fondées sur des données internationales ou locales ont été explorés. Les premiers résultats permettent d'identifier des tendances dans la variation spatiale des niveaux de **régulation des graines d'adventices par les carabes prédateurs de graines** et de **régulation des pucerons**, mais ne sont valables que pour des situations pédoclimatiques et agronomiques bien particulières.

Pour ces trois SE de régulations biologiques, un travail de validation des méthodes et des résultats d'évaluation préliminaires reste à mener.

### Un premier pas vers la quantification de la contribution relative des SE intrants à la production agricole

Bien que cet enjeu ne soit pas propre aux écosystèmes agricoles, très peu d'études ont à ce jour tenté d'estimer la contribution relative des facteurs de production "naturels" et "anthropiques" à la production de biens agricoles. Les méthodes permettant de réaliser ce partitionnement ne font pas consensus. Dans cette étude, les simulations du système sol-plante ont également été utilisées pour proposer une première évaluation de la **part de la production permise par les SE intrants de "fourniture d'N minéral" et de "restitution d'eau aux plantes cultivées"** (ci-après désignés SE intrants "N et eau"), **considérant un état des écosystèmes agricoles donné**[7]. Ces simulations ont aussi permis d'estimer la **contribution relative des SE de "fourniture d'N minéral" et de "stockage et restitution d'eau aux plantes cultivées", d'une part, et des pratiques exogènes associées (fertilisation azotée et irrigation), d'autre part, dans la couverture des besoins en azote et en eau de la culture de rente** (voir Figure 2 en page suivante).

**Les résultats obtenus sont des ordres de grandeur à interpréter avec précaution**. Leur analyse transversale permet de dégager de grandes tendances sur les relations entre SE intrants "N et eau", pratiques de fertilisation et d'irrigation et niveaux de production agricole. **A l'échelle de la rotation, la part de la production imputable aux SE intrants "N et eau" serait de l'ordre de 50 % en moyenne annuelle**, 95 % des valeurs variant entre 29 et 71 %. Ces résultats sont, par construction, directement liés à la distribution spatiale des cultures ainsi qu'à leur distribution temporelle dans les séquences de culture.

Les situations (combinaisons [système de culture x contexte pédoclimatique]) présentant un bas niveau absolu moyen de SE intrants "N et eau" ne correspondent pas obligatoirement à des situations dans lesquelles la part de la production permise par ces

[7] Taux de carbone et d'azote organique du sol définis pour chaque situation pédoclimatique

SE intrants est faible. Ceci confirme la nécessité d'examiner le niveau de chaque SE relativement aux besoins des cultures de la rotation dans le pédoclimat considéré.

Par ailleurs, le blé, qui présente un niveau de production permis par les SE intrants "N et eau" assez élevé en moyenne, tire vers le haut les résultats moyens obtenus à l'échelle de la rotation du fait de sa fréquence dans les séquences de culture simulées. Ce phénomène est amplifié lorsque le blé est en rotation avec le tournesol (Sud-Ouest) puisque cette culture présente les plus hauts niveaux moyens de part de la production permise par les SE intrants "N et eau". A l'inverse, dans les séquences incluant du colza, les niveaux moyens de part de la production imputable au SE intrants "N et eau" sont légèrement tirés vers le bas : cette culture présente d'importants besoins en azote, or elle est essentiellement cultivée dans le grand bassin parisien où le niveau moyen de SE de "fourniture d'N minéral" est relativement faible.

Les niveaux moyens de part de la production permise par les SE intrants "N et eau" les plus faibles sont très liés à la présence de monoculture de maïs grain dans des zones climatiques à important déficit hydrique climatique en été. Dans ces situations, l'irrigation semble indispensable pour maintenir des hauts niveaux de rendement.

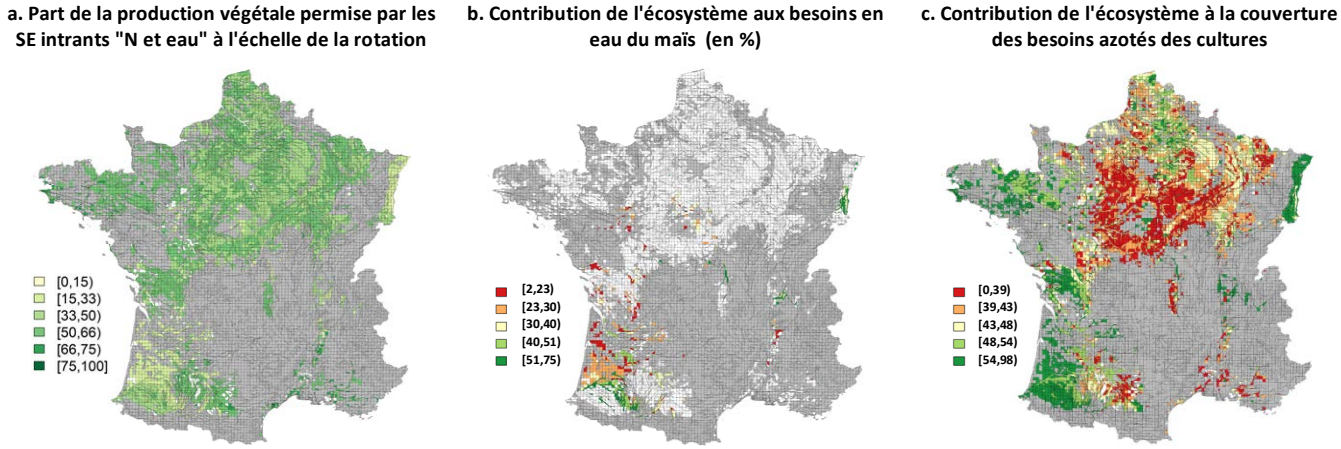
Enfin, **à l'échelle du système de culture, notons que la quantité totale d'azote minéral disponible** – somme des quantités d'azote minéral disponible au semis, fournie par l'écosystème pendant le cycle de la culture, et fournie par la fertilisation – **est supérieure aux besoins des cultures dans toutes les situations analysées.**

Même en tenant compte des limites du dispositif d'évaluation, ces résultats laissent entendre qu'il existe des marges de manœuvre importantes pour mieux transformer la capacité de l'écosystème à fournir de l'azote (SE potentiellement rendu par l'écosystème) en une fourniture effective d'azote minéral aux plantes cultivées (niveau de SE effectivement exploité par l'agriculteur) se traduisant *in fine* en une réduction significative des apports exogènes d'azote (avantage dérivé du SE par le gestionnaire de l'écosystème agricole). Il est question ici, avant tout, de développer des outils de pilotage de la fertilisation et des formes et technologies d'épandage d'engrais azotés qui permettent d'optimiser les apports pour couvrir les besoins des cultures considérant leur dynamique et celle du SE de fourniture d'azote.

### Un travail à poursuivre sur le statut et le rôle de l'animal d'élevage dans la fourniture de SE

L'animal d'élevage au pâturage est considéré dans ce cadre d'analyse comme une des composantes de l'écosystème agricole (biodiversité planifiée) et comme le support de la production de biens agricoles. Cette première approche du statut et du rôle de l'animal dans l'écosystème du point de vue des SE reste à affiner et à stabiliser. L'étude a réalisé une quantification du niveau de production de biens animaux permis par la production végétale du territoire local (résultats non présentés ici). Au-delà de son rôle de support de la production animale, il sera nécessaire d'analyser le rôle de l'animal considéré comme organisme à l'origine de SE (par exemple, SE de "régulation des maladies de l'animal d'élevage").

**Figure 2.** Evaluation en relatif : part de la production végétale permise par les SE intrants "N et eau", et contribution respective de chacun de ces SE à la couverture des besoins des cultures (valeurs annuelles moyennes, en %)




Résolution spatiale : unité de simulation ; Pixels gris : pas de simulations "grandes cultures" ; Pixels blancs : exclus de l'analyse.

## Les SE rendus par les écosystèmes agricoles à la société

Au-delà des SE "intrants", les écosystèmes agricoles contribuent à la fourniture d'autres types de SE, dont le bénéficiaire direct est la société dans son ensemble (incluant les agriculteurs en tant que citoyens). Ces SE sont essentiellement de deux ordres : (i) des SE de régulation qui contribuent à moduler des phénomènes portant préjudice au bien-être humain tels que le changement climatique ou la diffusion de polluants dans les différents compartiments de l'environnement, et (ii) des SE dits "culturels" dont la société dérive des avantages récréatifs, esthétiques et spirituels.

### La complémentarité des approches "SE" et "impact"

Les écosystèmes agricoles contribuent à la qualité biophysique du cadre de vie, *via* la **régulation de la qualité de l'eau** (utilisable ensuite pour des usages variés), et la **régulation du climat global**. Une analyse transversale des caractéristiques de ces SE met en évidence le rôle central de trois éléments de l'écosystème dans leur fourniture : (i) la configuration spatiale et temporelle de l'écosystème (couverts végétaux gérés et animaux) ; (ii) la matière organique du sol ; et (iii) la biodiversité du sol.

En complément du niveau de fourniture de ces deux SE, **le niveau des impacts négatifs sur l'environnement** liés aux processus impliqués dans la fourniture de ces SE a également été estimé. L'analyse comparative des résultats livrés par ces deux types d'évaluation, **SE et impacts environnementaux**, illustre leur complémentarité : **la connaissance du niveau de l'un ne permet pas d'inférer directement le niveau de l'autre**.

Seul le niveau de **régulation de la qualité de l'eau vis-à-vis de l'azote (N)** a pu être quantifié. Des pistes méthodologiques ont néanmoins été proposées pour l'atténuation des contaminants (pesticides) par les sols d'une part, et la régulation de la qualité de l'eau drainée vis-à-vis du phosphore (P) et du carbone organique dissous (COD) d'autre part.

Le niveau du SE de "**régulation de la qualité de l'eau vis-à-vis de N**", estimé *via* la quantité d'azote non lixivié, est d'autant plus élevé que le niveau de biomasse produit est important : c'est **avant tout un processus de rétention d'azote dans la biomasse récoltée ou restituée au sol** qui détermine le niveau de SE. Ainsi, comme démontré dans des travaux antérieurs, **la couverture du sol pendant les périodes de ruissellement (régulation du P) ou de drainage (N et COD) est un déterminant majeur du niveau de ce SE**. La quantité d'azote non lixivié a été estimée en absolu et en relatif des entrées d'azote. La comparaison de ces deux valeurs montre qu'un faible niveau de SE en absolu ne signifie pas que le niveau de SE relatif est faible : une faible quantité d'azote non lixivié peut en effet correspondre à une très grande part de l'azote entrant, notamment si les apports exogènes sont faibles (ce qui est le cas pour les cultures de tournesol par exemple).

L'**impact des systèmes de culture actuels sur la qualité de l'eau de drainage** a été estimé à l'aide de deux indicateurs : la **quantité d'azote effectivement lixivié** et la **concentration en nitrate ($NO_3^-$) dans ces eaux**. Ces deux indicateurs d'impact sont corrélés négativement avec les indicateurs du niveau absolu et relatif de fourniture du SE, signifiant que l'impact du système de culture sur la qualité de l'eau drainée tend à être d'autant plus faible que le niveau de SE est fort. Cependant, la relation n'est pas très forte, montrant qu'une même capacité de "rétention" de l'azote par le système "sol-plante" peut être associée à des niveaux d'impacts très différents. Par exemple, les situations dans lesquelles 80 % de l'azote entrant dans le système n'est pas lixivié sont associées à des quantités d'azote lixivié variant de 20 à 100 kg N/ha/an, et des concentrations nitriques variant de moins de 50 mg $NO_3^-$/l à plus de 150 mg $NO_3^-$/l.

**Concernant la régulation du climat global**, deux composantes du SE ont été examinées : le niveau actuel du stock de carbone et la dynamique annuelle de stockage. En premier lieu, **l'horizon 0-30 cm des sols de grande culture et de prairie représente au total un stock de carbone de l'ordre de 1,75 milliard de tonnes, soit 47 % du stock total de carbone des sols français**[8]. Ce stock équivaut à 16 ans d'émissions françaises de gaz à effet de serre (GES) tous secteurs cumulés, voire le double si on considère l'horizon 0-1 m. **Malgré un stock par unité de surface moindre que celui des prairies, les écosystèmes agricoles de grande culture représentent le stock le plus important du fait d'une surface concernée plus grande.** La distribution spatiale des résultats traduit un effet combiné du pédoclimat et du mode d'occupation du sol sur les stocks de carbone : rapportés à l'hectare, les stocks les plus élevés sont observés dans les zones d'altitude et/ou de prairie, les stocks les plus faibles correspondent aux zones de plaine et de grandes cultures. **Le stock de carbone associé aux formations ligneuses situées dans les parcelles représente en moyenne 7 % du stock total de l'écosystème – voire moins de 5 % si on considère le stock du sol sur l'horizon 0-1 m – et très rarement plus de 20 %** (dans les zones où les surfaces de formations ligneuses sont les plus importantes). Si elles contribuent peu au stock de carbone total des écosystèmes agricoles, la conservation des formations ligneuses est néanmoins associée à un enjeu fort du fait de l'importance des éléments semi-naturels dans la fourniture de nombreux autres SE (notamment les régulations biologiques).

En second lieu, l'estimation de la variation moyenne annuelle du stock de carbone dans les sols de grande culture (considérant les pratiques agricoles actuelles) montre qu'**en moyenne, les systèmes de grande culture déstockent annuellement 0,03 % du carbone du sol**. Les valeurs obtenues pour les systèmes qui stockent du carbone sont **majoritairement inférieures à 0,2 % et très rarement supérieures à 0,3 %**, autrement dit bien inférieures à l'accroissement annuel de 0,4 % du stock de carbone du sol ciblé par l'initiative "4 pour mille" lancée par la France. Les écosystèmes agricoles qui stockent annuellement du carbone se situent plutôt dans les zones à plus faible niveau de stock actuel – autrement dit les grands bassins céréaliers intensifs – alors que dans les zones d'élevage, où le stock actuel est souvent plus élevé du fait du contexte pédoclimatique et de l'occupation passée des sols, les systèmes de culture en place conduiraient à un déstockage important. L'estimation de ces deux composantes du SE pour les systèmes de prairies, non réalisée ici, fait l'objet d'une étude complémentaire en cours.

**L'impact des systèmes de culture actuels sur le climat** a été évalué à l'aide du **bilan net annuel des échanges de $CO_2$ et de $N_2O$ entre l'écosystème agricole et l'atmosphère** (les flux de $CH_4$ sont considérés comme négligeables en grande culture)**. Les résultats montrent que les agroécosystèmes cultivés sont des sources de GES dans leur très grande majorité** (bilan GES positif), **du fait, principalement, des émissions de $N_2O$**. Seuls quelques cas simulés sont des puits de GES en raison des faibles émissions de $N_2O$ qui les caractérisent. **Les émissions de $N_2O$ tendent à être d'autant plus élevées que les apports exogènes d'azote le sont, confirmant le rôle de la fertilisation azotée dans ces émissions.** La relation est néanmoins lâche, traduisant la multiplicité des facteurs impliqués dans la production de $N_2O$ (température, teneur en eau, pH…). On observe enfin un **effet favorable de la présence de cultures intermédiaires sur le bilan des GES**. Elles augmentent le stockage de carbone dans le sol et réduisent les émissions de $N_2O$. Une première comparaison qualitative de la distribution spatiale des résultats d'évaluation du SE et des impacts associés semble, là encore, montrer qu'un même niveau de bilan net de GES est associé à différents niveaux de SE et inversement.

## La limite de l'approche par type d'écosystème pour caractériser les "services culturels"

Les écosystèmes agricoles sont des éléments constitutifs du paysage qui, *via* la perception qu'en a l'Homme, sont plus ou moins attractifs pour la pratique d'activités récréatives. En ce sens, l'assolement, la structure du parcellaire et le positionnement des habitats semi-naturels constituent des déterminants biophysiques clefs du potentiel d'attractivité du paysage. Pour autant, tels que définis dans la typologie CICES, les "services" récréatifs correspondent davantage à une typologie d'usages et/ou de valeurs des paysages qu'à des services écosystémiques au sens retenu dans le cadre d'analyse adopté dans cette étude. Il est donc proposé de définir ces SE comme la capacité des écosystèmes agricoles à fournir un cadre pour la pratique d'activités récréatives de plein air, ou "potentiel récréatif des écosystèmes agricoles". Comme les SE de régulations biologiques, **le potentiel récréatif** résulte du paysage dans son ensemble. A leur différence, il **s'exprime à l'échelle du paysage tout entier**, espace au sein duquel plusieurs types d'écosystèmes se côtoient. En conséquence, l'entrée par grands types d'écosystèmes n'apparaît pas pertinente pour examiner ce type de "services" rendus à la fois par la nature et par l'agencement relatif des différents types d'écosystèmes au sein du paysage.

[8] Estimé à 3,725 Pg dans la littérature.

## De l'évaluation biophysique à l'évaluation économique des SE

### Les méthodes mobilisables

Si l'analyse biophysique des SE décortique les interactions entre le fonctionnement des écosystèmes et les SE, l'approche socio-économique cherche à analyser le lien complémentaire entre les SE et le bien-être humain. Bien que les deux approches soient fortement connectées par le concept d'avantage, les articuler est souvent considéré comme un défi dans la littérature scientifique. En effet, l'approche biophysique débouche le plus souvent sur des indicateurs de SE difficilement utilisables par les économistes. Par ailleurs, **l'approche économique examine souvent les avantages dérivés des SE, plutôt que les SE eux-mêmes**. Or, évaluer les avantages, fonctionnellement déconnectés de l'écosystème et relevant du sous-système socio-économique, nécessite de prendre en compte les apports de capital (matériel, humain, institutionnel, financier) mis en œuvre pour exploiter les SE.

En cohérence avec la démarche générale de l'étude, l'approche retenue consiste à **attribuer une valeur économique aux SE à partir de l'évaluation biophysique de leur niveau de fourniture**. Les méthodes de **préférences révélées**, fondées sur l'observation du comportement économique réel des bénéficiaires des SE, ont été privilégiées car elles sont plus adaptées à l'évaluation de SE faisant l'objet d'un usage effectif[7]. Ces méthodes permettent d'obtenir des valeurs *ex post*, estimées indirectement à partir des prix pratiqués sur des marchés sur lesquels sont échangés des biens dont la consommation est liée au SE d'intérêt. Parmi elles, ce sont essentiellement les méthodes des **coûts de remplacement** et des **dommages évités** qui ont été appliquées à l'évaluation des SE. Ces méthodes cherchent à estimer respectivement les coûts qui devraient être supportés par la société si le recours à l'utilisation de technologies de substitution était nécessaire (ex. engrais azotés de synthèse en remplacement du SE de "fourniture d'N minéral aux plantes cultivées"), ou ceux des pertes liées à la disparition des SE (ex. pertes de récolte en l'absence de régulation des insectes ravageurs).

### Difficultés de mise en œuvre et précautions d'interprétation des résultats

L'application des méthodes décrites ci-avant à l'évaluation économique des SE a été instruite pour huit SE de régulation préalablement quantifiés sur le plan biophysique. L'évaluation économique n'a néanmoins pu être menée à terme que pour trois d'entre eux.

**Lorsque les indicateurs biophysiques sont directement mobilisables pour l'évaluation économique, les valeurs obtenues sont à prendre avec précaution et elles ne sont en outre pas additionnables** compte tenu de la diversité des méthodes d'évaluation employées.

L'**actualisation de l'évaluation biophysique du SE de pollinisation des espèces cultivées *via* la méthode des dommages évités** illustre la nécessité de disposer d'une évaluation biophysique fiable de la part de la production liée à un SE. En effet, l'indicateur de valeur économique du service de pollinisation entomophile (VESPE) actuellement utilisé dans divers travaux ne tient pas compte de l'existence possible d'un déficit de pollinisation (que l'évaluation biophysique tend à mettre en évidence) : la surestimation de la VESPE qui en découle est d'autant plus importante que le déficit de pollinisation est important.

Appliquée aux **SE de "fourniture d'N minéral" et de "stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées"** (voir Encadré 2), la **méthode des coûts de remplacement** ne devrait être envisagée qu'à une résolution spatiale fine (ex. PRA) : calculer une valeur nationale unique revient à envisager une situation improbable sur le plan biophysique et dont les répercussions en termes de rétroactions sur la disponibilité et les coûts des intrants de substitution (engrais azotés de synthèse et eau d'irrigation) ne sont pas pris en compte par la méthode. L'évaluation conjointe de ces deux SE *via* la méthode des dommages évités, fournit des informations complémentaires, mais très préliminaires, sans autoriser la comparaison des valeurs puisqu'elles sont obtenues en considérant des référentiels différents.

**A l'inverse, lorsque la caractérisation biophysique du SE repose sur des indicateurs indirects de son niveau de fourniture, les méthodes évoquées ci-dessus ne sont pas applicables**. C'est par exemple le cas pour les SE de "régulation des graines d'adventices" et de "régulation des insectes ravageurs", dont les indicateurs biophysiques prédisent une densité de bioagresseurs ou de leurs prédateurs qui, en l'état actuel des connaissances, ne peut être reliée à une quantification des dommages sur la production, ni à l'utilisation de technologies alternatives de compensation du SE (ex. emploi de produits phytosanitaires). C'est également le cas du SE de "stabilisation des sols et contrôle de l'érosion", pour lequel il est difficile de faire le lien entre une quantité de sol non érodée (stabilisée) et une quantité de bien agricole produite. Pour dépasser ces blocages et mettre en œuvre la méthode des dommages évités, des travaux de recherche sont à poursuivre sur les relations quantitatives entre SE, pratiques agricoles, niveau de production, et de gestion du paysage.

Concernant le SE de "régulation de la qualité de l'eau", son évaluation économique *via* la méthode des coûts de remplacement nécessiterait de connaître la quantité d'eau de qualité restituée par l'écosystème agricole. Or la quantification biophysique de ce SE livre une quantité d'azote non lixivié.

Enfin, notons que la limite des approches s'appuyant sur des prix de marché réside dans le fait qu'elles supposent que les prix sont des bons indicateurs de la demande sociale et de la rareté des biens et services utilisés pour remplacer les SE. Or, les prix de marché intègrent souvent tout un ensemble de facteurs sociaux ou politiques, comme des subventions.

## Vers une gestion de l'offre en SE des écosystèmes agricoles

Les processus qui sous-tendent la fourniture des SE sont fortement intriqués. En conséquence, des déterminants biophysiques communs sont impliqués dans la fourniture de plusieurs SE. Dès lors, toute modification dans la gestion de l'écosystème (notamment *via* les pratiques agricoles) est susceptible d'affecter le niveau de fourniture de plusieurs SE. Considérée sous le prisme d'un seul SE ou de la seule production de biens agricoles, la gestion de l'écosystème devient celle de la maximisation de ce SE ou de ce bien, possiblement au détriment d'un ou plusieurs autres. Un cas emblématique est celui de la maximisation de la production de biens agricoles fondée sur l'utilisation des intrants, au détriment de la diversité biologique sur laquelle repose l'ensemble des SE.

[7] Les SE actuellement non exploités mais qui pourraient l'être dans le futur, tels que les ressources génétiques issues du microbiote du sol, n'ont pas été instruits dans le cadre de cette étude.

## Encadré 2. Proposition d'évaluation économique de la contribution des SE intrants à la production agricole : cas des SE de "fourniture d'N minéral" et de "stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées"

**• Evaluation des SE pris séparément**

L'évaluation économique du SE de "fourniture d'N minéral aux plantes cultivées" et du "stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées" a été réalisée par la méthode des **coûts de remplacement**, en estimant le coût des engrais azotés de synthèse d'une part, et de l'eau d'irrigation d'autre part, qu'il serait nécessaire d'apporter pour maintenir le niveau de production en l'absence du SE, en supposant que le gestionnaire de l'écosystème agricole compense l'absence du SE par des apports optimisés relativement aux besoins de la culture. Les résultats de cette évaluation économique (*cf.* tableau ci-dessous) donnent un premier ordre de grandeur du coût de remplacement de ces deux SE pour les surfaces d'écosystèmes agricoles couvertes par les huit cultures majeures (représentant en moyenne 91 % des surfaces de grandes cultures et cultures industrielles de France métropolitaine entre 2010 et 2012).

**• Valeur économique des SE intrants "N et eau" pris conjointement**

En appliquant les principes de la méthode des **dommages évités**, une **valeur économique des deux SE intrants "N et eau" pris conjointement** a été obtenue en calculant la valeur monétaire de la part de la production agricole imputable aux SE intrants "N et eau". Les résultats de cette deuxième évaluation économique (*cf.* tableau ci-dessous) correspondent à un premier ordre de grandeur de la valeur des dommages (en termes de pertes de production) associés à l'absence des SE intrants "N et eau" considérés conjointement, pour sept cultures (couvrant en moyenne 89 % des surfaces de grandes cultures et cultures industrielles de France métropolitaine entre 2010 et 2012).

**• Interprétation des résultats**

Valeurs annuelles moyennes des SE de "fourniture d'N minéral" et de "stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées", évalués séparément *via* la méthode des coûts de remplacement, et conjointement *via* celle des dommages évités
(valeurs France entière, moyennes 2010-11-12)

| | **Méthode des coûts de remplacement** [a] | | | **Méthode des dommages évités** | Valeur totale moyenne de la production agricole à l'échelle de la France métropolitaine (M€/an) |
|---|---|---|---|---|---|
| | **SE "fourniture d'N minéral aux plantes cultivées"** (M€/an) | **SE "stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées"** (M€/an) | | **SE intrants "N et eau" pris conjointement** (M€/an) | |
| | | Coût minimal | Coût maximal | | |
| **Betterave sucrière** | 45 | 86 | 719 | 456 | 1 373 |
| **Blé tendre** | 369 | 31 | 256 | 4 917 [b] | 8 605 |
| **Blé dur** | *Non calculé* | *Non calculé* | *Non calculé* | | |
| **Orge** | 98 | 110 | 920 | 1 027 | 1 794 |
| **Colza** | 120 | 331 | 2 775 | 615 | 2 320 |
| **Maïs fourrage** | 105 | 122 | 1 023 | 1 093 [c] | 1 589 |
| **Maïs grain** | 191 | 25 | 213 | 1 173 | 3 129 |
| **Pois de printemps** | 43 | 83 | 697 | *Non calculé* [d] | / |
| **Tournesol** | 43 | 15 | 122 | 539 | 757 |

[a] Prix de marché moyen de l'azote : 0,85 €/kgN sur la période janvier 2008- janvier 2016 (statistique agricole) ; Coût moyen de l'irrigation : de 0,04 €/m³ à 0,335 ct €/m³ (coût très variable suivant les ressources mobilisées et les équipements d'irrigation utilisés, qu'il n'a pas été possible de spatialiser)

[b] Les surfaces de blé dur ont été assimilées à des surfaces de blé tendre en termes de ratio de production permise par les SE et de prix.

[c] La valeur économique du maïs fourrage a été estimée en relatif du maïs grain *via* l'utilisation d'un coefficient (0,5) pour traduire les niveaux moyens de rendement exprimés en tonne de matière sèche par hectare (t MS/ha), en équivalent tonne de grain de maïs par ha (t/ha), puis en appliquant le prix (€/t) du maïs grain.

[d] Les données sur le prix moyen de la culture de pois n'étant pas disponibles dans le référentiel FAO, cette culture n'a pas été considérée.

Ces valeurs doivent être analysées avec la plus grande précaution, et n'ont pas vocation à être utilisées telles quelles dans un objectif de prise de décision. Tout d'abord, les indicateurs biophysiques utilisés comme point de départ à l'évaluation économique présentent leurs propres limites qui affectent nécessairement la robustesse de l'évaluation économique.

Par ailleurs, calculer des valeurs nationales revient à envisager la situation extrême dans laquelle les deux SE intrants considérés ici ne s'exprimeraient nulle part. Il serait donc nécessaire de fertiliser ou d'irriguer l'ensemble des cultures en réaction à la disparition de chacun des deux SE pour toutes les surfaces des cultures considérées. De telles situations d'absence généralisée de l'un ou l'autre de ces SE auraient nécessairement un fort impact sur la disponibilité et le prix des engrais de synthèse et de l'eau d'irrigation et des rétroactions sur le comportement des agriculteurs, deux phénomènes qui ne sont pas pris en compte dans le calcul. A titre de comparaison, le coût d'une sécheresse totale en France serait en réalité celui d'une perte de l'ensemble des récoltes. Il serait donc souhaitable de borner le coût d'irrigation ou de fertilisation par la valeur de la marge brute de l'agriculteur. En effet, si ces coûts sont plus élevés que la marge brute, il devient plus rentable de stopper la culture ou d'en changer la nature, autrement dit de reconfigurer l'écosystème agricole. Pour la raison évoquée ci-dessus, il est délicat de sommer les valeurs obtenues culture par culture afin d'estimer un total "toutes cultures".

D'autres hypothèses simplificatrices sont faites ici : on suppose notamment que l'agriculteur compenserait l'absence de SE de "fourniture d'N minéral aux plantes cultivées" par l'utilisation exclusive d'engrais de synthèse. Or, d'autres stratégies pourraient être développées, notamment l'épandage d'engrais organique ou la réduction des exportations de biomasse. Comme mentionné ci-avant, le niveau des coûts de remplacement peut conduire l'agriculteur à reconfigurer l'écosystème, par exemple en introduisant des légumineuses comme culture de rente ou en couvert intermédiaire.

Enfin, du fait de la différence entre les méthodes d'évaluation employées, ces deux séries de résultats ne doivent en aucun cas être comparées. S'appuyant sur des situations de référence et des technologies de substitution différentes, les résultats obtenus pour chacun des deux SE de "fourniture d'N minéral" et de "stockage et restitution de l'eau aux plantes cultivées" évalués séparément *via* la méthode des coûts de remplacement, ne sont pas comparables. Sommer ces deux valeurs reviendrait à faire l'hypothèse que les facteurs de production qui entrent en jeu sont complètement substituables, ce qui n'est pas le cas (du fait des interactions biophysiques entre les processus relatifs à l'azote et à l'eau). En d'autres termes, les deux premières valeurs et la troisième constituent deux informations complémentaires mais non comparables sur l'évaluation des SE intrants relatifs à l'eau et l'azote.

Pour concevoir une stratégie de gestion des SE à l'échelle d'un territoire, il est donc nécessaire de passer de l'analyse individuelle des SE à une approche multiservices visant à caractériser l'offre globale actuelle de SE, la façon dont ces SE interagissent, et les leviers existants pour conserver ou développer tout ou partie de ces SE. Or, historiquement, la majorité des travaux sur les SE s'est focalisée sur l'évaluation d'un seul ou d'un nombre limité de SE. Ils ont plus rarement envisagé une large gamme de SE fournis par un écosystème.

## L'analyse des bouquets de SE, étape nécessaire mais non suffisante pour déterminer une stratégie de gestion

Un bouquet (ou un panier) de SE est défini ici comme un ensemble de SE observés au sein d'une unité spatiale et sur un pas de temps donné. La "forme" du bouquet est caractérisée par les niveaux respectifs des SE qui le composent, sans pour autant que les causes possibles de leur concomitance ne soient établies. L'analyse des bouquets de SE peut permettre au décideur de réaliser un diagnostic sur l'offre de SE d'un territoire (bassin versant, PRA, etc.), étape préalable à la définition d'objectifs vers lesquels tendre en termes de "forme" du bouquet de SE rendus par ce territoire. Or, le plus souvent, des écosystèmes de natures différentes (forestiers, aquatiques, urbains, divers types d'écosystèmes agricoles…) coexistent au sein des aires concernées. Il est donc nécessaire de **disposer, pour chaque SE, d'un jeu d'indicateurs adaptés aux spécificités des différents types d'écosystèmes représentés dans le territoire étudié**. La majorité des travaux actuels sur l'évaluation des bouquets de SE semble occulter cette difficulté, en considérant un niveau nul de SE pour un type d'écosystème donné quand le SE n'a pas été quantifié pour ce type d'écosystème.

**L'approche par bouquets de SE constitue encore actuellement un défi méthodologique, et sa mise en œuvre n'est pas clef en main**. De nombreuses méthodes sont mobilisables pour identifier les bouquets de SE, avec chacune leurs qualités et faiblesses. L'une d'entre elles a été appliquée ici à deux ensembles de SE et biens agricoles rendus par les écosystèmes de grande culture, respectivement à l'agriculteur et à la société, afin de présenter le potentiel d'information qu'elle peut délivrer dans un objectif de décision publique. Sur le jeu de données utilisé, l'analyse statistique des bouquets rendus aux agriculteurs met en évidence trois groupes de PRA caractérisés chacun par une "forme" de bouquets (ou clusters) qui leur est propre. De façon similaire, quatre groupes de PRA sont identifiés relativement aux bouquets rendus à la société. On observe également une congruence partielle entre les bouquets "agriculteurs" et "société". Cette analyse offre une image à l'instant *t* du niveau moyen de fourniture des SE sur un territoire, mais **ne fournit pas d'information sur les mécanismes écologiques responsables des interactions entre SE**. Or, **une connaissance approfondie des relations biophysiques entre les SE est nécessaire** pour appréhender les possibles effets des modifications de l'écosystème sur le niveau de fourniture des SE.

## Comprendre les interactions entre SE…

Les déterminants biophysiques impliqués dans la fourniture de plusieurs SE sont considérés comme les **composantes clefs de l'écosystème et du paysage sur lesquelles les agriculteurs (*via* les pratiques agricoles) et les autres gestionnaires de l'espace peuvent jouer pour modifier ou conserver le niveau des SE**. Considérant le fait que la biodiversité est au centre des enjeux des politiques et des stratégies de gestion des SE, l'analyse est focalisée sur les grandes relations impliquant les composantes clefs de la biodiversité qui déterminent les niveaux des quatorze SE instruits dans cette étude (Figure 3).

• La **configuration spatiale et temporelle des couverts végétaux gérés** au sein de la parcelle – incluant les adventices et les habitats semi-naturels présents dans la parcelle – joue un rôle central car déterminant de tous les SE de régulation. Or, très peu de travaux d'évaluation des SE sur de grandes étendues prennent en compte les effets de la distribution temporelle des couverts végétaux gérés, autrement dit des séquences de culture. L'intégration des séquences de culture dans la méthode d'évaluation de nombreux SE constitue donc une avancée méthodologique.

• Le **taux de MO du sol** détermine directement le niveau de fourniture de huit SE de régulation. Cet état organique des sols est lui-même fortement déterminé par les couverts végétaux gérés mais aussi par les communautés microbiennes et la méso- et macrofaune du sol. Là encore, la modélisation dynamique des systèmes sol-plantes(-animaux), a permis de prendre en compte la dynamique des interactions entre couverts végétaux (séquences de culture), état organique des sols et SE relatifs aux cycles de l'eau, de l'azote et du carbone.

• L'abondance et la diversité de trois composantes de la biodiversité associée, que sont les **auxiliaires de culture** (pollinisateurs, prédateurs et parasites des bioagresseurs), la **méso-macrofaune endogée et épigée** et les **micro-organismes du sol**, déterminent également un grand nombre de SE.

• Enfin, la **composition** et la **configuration du paysage** déterminent à la fois, de façon directe, le potentiel récréatif de l'écosystème, et, de façon indirecte *via* les auxiliaires de culture, les SE de régulations biologiques.

Cette analyse transversale fait par ailleurs clairement apparaître **les interactions directes existant entre les six SE liés au fonctionnement du sol**. Ainsi, le SE "structuration des sols" est un déterminant biophysique des cinq autres SE.

Cette schématisation du fonctionnement de l'écosystème agricole et de ses interactions avec le paysage est un premier pas vers le développement d'outils d'aide à la décision pour une gestion durable de l'état des écosystèmes et des SE associés. Ces outils devraient permettre d'instruire plus finement les relations entre SE suivant les conditions pédoclimatiques locales, voire d'anticiper les possibles effets des changements climatiques. Cette analyse, qui permet de caractériser les conditions de fourniture des SE, permet ainsi de "dépasser" les approches générales, peu ciblées, reposant sur des indicateurs "génériques" de maintien du bon état écologique des écosystèmes. Elle peut fournir un cadre pour la conception des dispositifs d'observation de l'état de l'environnement et de la biodiversité, fondés sur des mesures de terrain (ex. Observatoire national pour la biodiversité) en cours de développement.

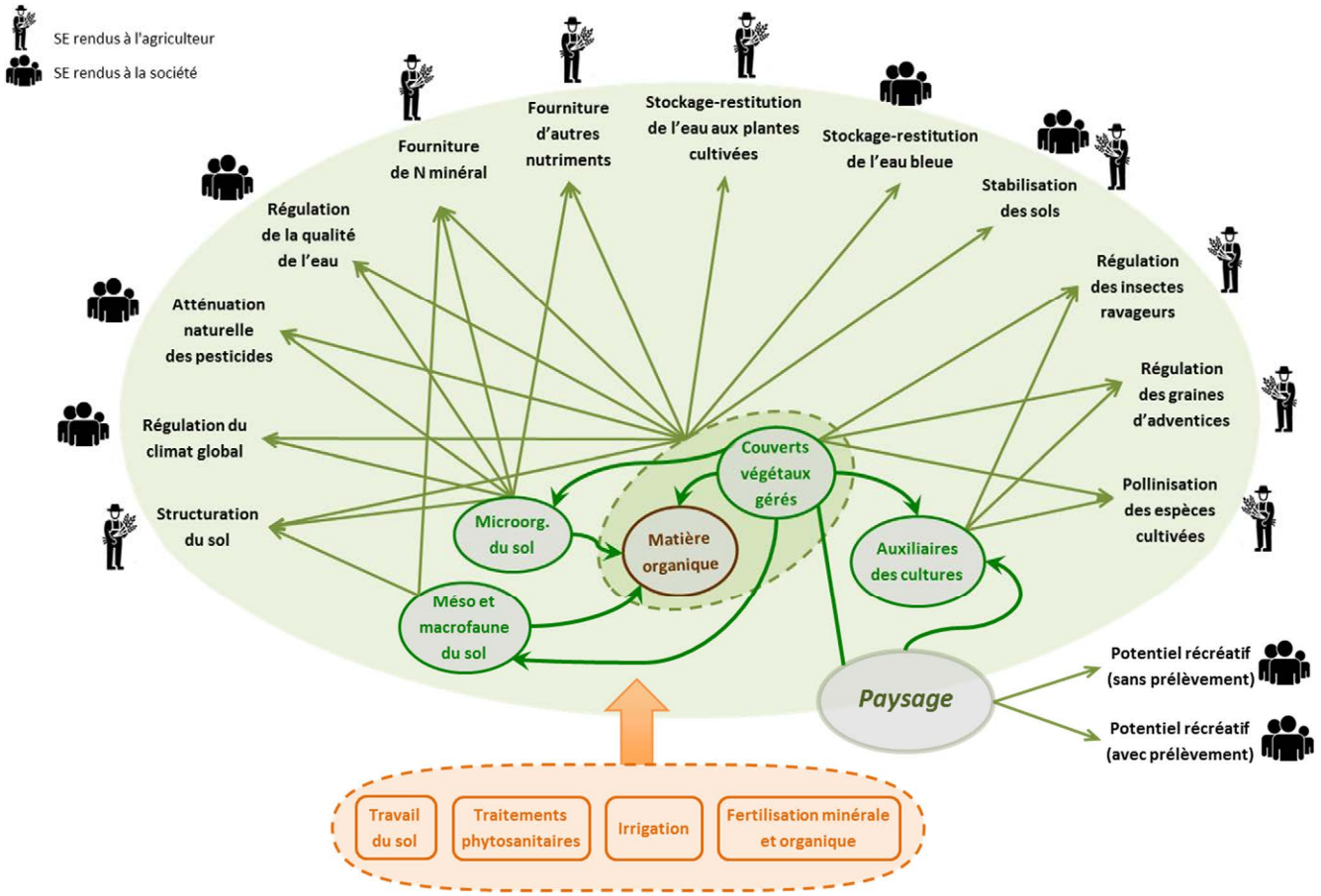
## … pour identifier les leviers de gestion

Considérant les composantes de l'écosystème sur lesquelles doivent porter prioritairement les actions de gestion, il est possible d'identifier les leviers permettant d'agir sur celles-ci. Dans le cadre d'analyse adopté ici, ces leviers correspondent aux facteurs anthropiques exogènes à l'écosystème, qui, par leur action sur les déterminants biophysiques, viennent moduler le niveau de fourniture des SE. **Quatre principaux types de pratiques constituent des leviers.**

• Les **traitements phytosanitaires** peuvent moduler le niveau des SE de régulations biologiques *via* leurs effets sur la structure et l'abondance des communautés d'auxiliaires des cultures et sur les espèces végétales hôtes de ceux-ci, comme certaines adventices. Ils modulent également l'expression de nombreux SE *via* leurs effets sur les communautés microbiennes des sols et la méso- et macrofaune.

**Figure 3.** Principales relations entre les SE *via* les composantes de la biodiversité

Représentation graphique simplifiée des relations entre les principales composantes de la biodiversité déterminant le niveau de fourniture des SE et les quatorze SE instruits dans l'étude (la liste des six déterminants clefs pourrait être complétée si d'autres SE venaient enrichir cette gamme de SE). Les quatre principaux types de pratiques agricoles permettant d'agir sur les composantes de l'écosystème sont également représentés (en orange).




Les principales relations entre composantes de la biodiversité sont représentées. Les boucles de rétroactions (*feedbacks*) des SE vers les composantes de la biodiversité ne sont pas représentées ici. Cette représentation, simplifiée au regard des nombreuses interactions existantes, a été conçue dans une logique d'identification des principales "cibles" d'une stratégie de gestion des écosystèmes agricoles qui viserait à développer les SE rendus au gestionnaire de cet écosystème et à la société.

## Encadré 3. Principes et méthodes de travail appliqués à l'étude

La présente étude a été réalisée par l'Inra, en adoptant les principes et la méthode établis par sa Délégation à l'expertise collective, à la prospective et aux études (DEPE) pour la conduite des Expertises scientifiques collectives (ESCo).

**• L'expertise scientifique pour éclairer la décision publique**

L'activité institutionnelle d'ESCo, développée depuis 2002 à l'Inra et objet d'une charte nationale signée en 2011, se définit comme une activité d'analyse et d'assemblage de connaissances pluridisciplinaires pour éclairer l'action publique. Elle met en évidence les acquis scientifiques, les points d'incertitudes, les lacunes et les éventuelles questions faisant l'objet de controverses scientifiques. La démarche d'ESCo peut se prolonger sous la forme d'études, qui incluent un volet de traitement et d'assemblage de données existantes (analyses statistiques, calculs, simulations à l'aide de modèles existants, méta-analyses…), fondé sur une analyse des connaissances scientifiques publiées. Tous ces exercices donnent lieu à la production d'un **rapport scientifique** rédigé par les experts, à partir duquel sont produits une **synthèse** et un **résumé**.

ESCo et études sont conduites dans le respect de principes garantissant la robustesse des argumentaires produits : compétence et pluralité des experts, impartialité (qui se traduit par l'examen des déclarations de liens d'intérêt des experts par le comité de veille déontologique de l'Inra), transparence de la méthodologie suivie et traçabilité des actions et moyens mis en œuvre au cours de l'opération.

**• Dispositif de l'étude**

La présente étude constitue une contribution à l'Evaluation française des écosystèmes et des services écosystémiques (EFESE), pilotée par le ministère en charge de l'Environnement (*via* le Commissariat général au développement durable – CGDD – et la Direction de l'eau et de la biodiversité – DEB). Le programme EFESE s'inscrit dans la stratégie européenne de la biodiversité pour 2020 et, à ce titre, constitue le volet français du programme européen *Mapping and Assessment of Ecosystem and their Services* (MAES). Le périmètre de l'EFESE s'étend à l'ensemble des écosystèmes terrestres et marins de France métropolitaine et d'Outre-mer, répartis en six grands types faisant l'objet d'études thématiques : les écosystèmes forestiers ; les écosystèmes agricoles ; les écosystèmes urbains ; les milieux humides ; les milieux marins et littoraux ; les zones rocheuses et de haute montagne.

**Quarante experts et contributeurs scientifiques** aux compétences disciplinaires complémentaires (écologie, agronomie, hydrologie, zootechnie, économie, etc.) ont été mobilisés dans cette étude. Ils ont été initialement identifiés par la DEPE à partir de leurs publications (attestant de leurs compétences disciplinaires). Ils proviennent de divers organismes de recherche et établissements d'enseignement supérieur publics. En complément, l'**ingénierie de données**, volet important d'une telle étude, a été réalisée en grande partie par des équipes de l'Inra.

• Le **travail du sol**, comme les traitements phytosanitaires, représente une perturbation du fonctionnement biologique des communautés microbiennes et de la faune des sols. Il peut aussi affecter les auxiliaires de culture circulant sur le sol, ou pour lesquels ce dernier constitue un lieu de nidification. Enfin, il a un rôle clef dans la distribution et la dynamique de la MO dans le sol.

• L'**irrigation**, *via* la modification de la teneur en eau du sol qu'elle induit, influe sur la croissance des couverts végétaux, le fonctionnement de la biodiversité du sol et la dynamique de la MO.

• Les **fertilisations minérale et organique** ont un effet sur la croissance des couverts végétaux, déterminant central des SE. La fertilisation organique influence aussi la dynamique des communautés microbiennes, de la méso- et macrofaune et de la MO.

En plus de ces facteurs exogènes, l'ensemble des **pratiques de configuration de l'écosystème**, qui déterminent la distribution et la diversité du couvert végétal, constituent par définition un levier supplémentaire de gestion des SE.

## Perspectives de recherche et développements futurs

**Par construction, l'étude est focalisée sur les systèmes de culture reposant sur un usage important d'intrants, qui représentent la majorité des situations de production actuellement pratiquées en France**. Pour concevoir des systèmes de production reposant davantage sur les SE et limitant le recours aux intrants exogènes, il est nécessaire de **faire progresser les connaissances sur les relations entre configuration de l'écosystème et du paysage, pratiques agricoles exogènes, climat, niveau de fourniture des différents SE et niveaux de production de biens agricoles** (notamment pour renseigner le sens de ces relations), ainsi que d'**analyser les dynamiques temporelles du niveau de SE sous l'effet des systèmes de culture**. Dans certains cas, les premiers travaux laissent entendre que cela pourrait amener à réviser profondément la vision du poids relatif des facteurs liés au système de culture et de ceux liés au paysage (cas des SE de régulations biologiques notamment). A court terme, l'analyse comparative de divers types de systèmes de culture ou de production plus économes en intrants exogènes – par exemple les systèmes d'agriculture de conservation ou encore les systèmes de polyculture-élevage intégrés – pourrait permettre de progresser dans cette voie. Le développement de modèles simulant les effets d'une large gamme de configurations d'écosystèmes et de pratiques agricoles exogènes sur le niveau de fourniture de différents SE devrait également aider à concevoir des stratégies de gestion des écosystèmes agricoles permettant de réduire ou lever les possibles antagonismes entre SE.

Pour réaliser ces travaux complémentaires, qui pourront s'appuyer sur le système d'information produit au cours de l'étude, il sera nécessaire de **disposer de données précises sur la caractérisation des pratiques agricoles** mises en œuvre. Actuellement, les seules informations disponibles à grande échelle sont celles des enquêtes "Pratiques culturales" réalisées par le Service de la statistique et de la prospective du ministère en charge de l'Agriculture. L'échelle de représentativité statistique de cette base de données (la région administrative) constitue le principal facteur limitant de son usage pour ce type d'études.

Le fonctionnement des écosystèmes agricoles a ici été examiné considérant leur état actuel, et la manière dont ils sont actuellement gérés. Or, des changements de nature d'écosystème, sous l'effet du changement climatique ou de choix d'aménagement du territoire (ex. urbanisation, reforestation) auront nécessairement un impact sur la fourniture des SE. Identifier les conditions d'une durabilité "dynamique" de la fourniture des SE vis-à-vis de ces différents types de changements nécessite d'identifier les propriétés biophysiques et socio-économiques clefs à l'origine de cette durabilité et sur lesquelles l'Homme pourrait agir pour maintenir le niveau des SE ou au contraire orienter l'offre de SE des écosystèmes en fonction des priorités sociétales.

Enfin, les leviers identifiés précédemment concernent spécifiquement la gestion des écosystèmes agricoles permettant de développer les SE analysés ici. **Ces leviers ne seront pas nécessairement les mêmes si d'autres types de SE et/ou d'écosystèmes sont considérés, ou si le décideur poursuit un objectif différent**. Il serait nécessaire de développer des méthodes d'évaluation multicritères dans lesquelles l'environnement serait représenté à l'aide d'indicateurs de trois sous-domaines clefs afin de prendre en compte les principaux enjeux de gestion associés aux écosystèmes agricoles : (i) les niveaux de SE rendus par les écosystèmes à l'agriculteur et à la société; (ii) les impacts environnementaux des activités agricoles ; (iii) la conservation de la biodiversité (ex. patrimoniale). La prise en compte des dis-services, non analysés dans l'étude, serait également nécessaire. Ce type de méthodes devrait aussi permettre d'identifier les antagonismes et synergies au sein d'un sous-domaine (ex. entre SE rendus aux agriculteurs et à la société) ou entre eux (ex. entre fourniture de SE et impacts environnementaux) aux niveaux d'organisation adaptés (ex. parcelle, agroécosystème, paysage, etc.).

***Pour en savoir plus :***

Tibi A., Therond O. (2017). *Evaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFESE.* Synthèse du rapport d'étude, Inra (France), 118 pages.

Therond O. (coord.), Tichit M. (coord.), Tibi A. (coord.) *et al.* (2017). *Volet "écosystèmes agricoles" de l'Evaluation Française des Ecosystèmes et des Services Ecosystémiques.* Rapport d'étude, Inra (France), 966 pages.

Le rapport complet de l'étude, la synthèse et le présent résumé sont disponibles sur le site internet de l'Inra.

*Photographie de couverture : © G. Brändle, U. Zihlmann (Agroscope) et A. Chervet (Office de l'agriculture et de la nature du canton de Berne)*

INRA SCIENCE & IMPACT
Délégation à l'Expertise scientifique collective, à la Prospective et aux Études
147, rue de l'Université
75338 Paris Cedex 07
France
Tél. : + 33(0) 1 42 75 94 90
www.inra.fr

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE