



HAL
open science

Apports de la télédétection au calcul d'indicateurs agri-environnementaux au service de la PAC, des agriculteurs et porteurs d'enjeu

Christian Bockstaller, Clélia Sirami, David Sheeren, Olivier Keichinger, Ludovic Arnaud, Arthur Favreau, Frédérique Angevin, Dominique Laurent, Guillaume Marchand, Emmanuel Delaroche, et al.

► To cite this version:

Christian Bockstaller, Clélia Sirami, David Sheeren, Olivier Keichinger, Ludovic Arnaud, et al.. Apports de la télédétection au calcul d'indicateurs agri-environnementaux au service de la PAC, des agriculteurs et porteurs d'enjeu. *Innovations Agronomiques*, 2021, 83, pp.43-59. 10.15454/ns4w-a314. hal-03190579

HAL Id: hal-03190579

<https://hal.inrae.fr/hal-03190579v1>

Submitted on 6 Oct 2021

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Apports de la télédétection au calcul d'indicateurs agri-environnementaux au service de la PAC, des agriculteurs et porteurs d'enjeu

Bockstaller C.¹, Sirami C.², Sheeren D.², Keichinger O.³, Arnaud L.⁴, Favreau A.⁵, Angevin F.⁶, Laurent D.⁵, Marchand G.⁵, De Laroche E.⁷, Ceschia E.⁸

¹ UMR LAE, Université de Lorraine, INRAE, F-68000 Colmar

² UMR DYNFOR, Université de Toulouse, INRAE, INP-ENSAT, INP-EI Purpan, F-31326 Castanet-Tolosan

³ Chercheur indépendant

⁴ ASP, CESBIO

⁵ IGN, F-94165 Saint-Mandé

⁶ Eco-Innov, INRAE, F- 78850 Thiverval – Grignon

⁷ ASP, F-93555 Montreuil

⁸ CESBIO, INRAE, Université de Toulouse, CNES/CNRS/INRAE/IRD/UPS, F- 31401 Toulouse

Correspondance : eric.ceschia@inrae.fr

Résumé

Le développement de méthodes d'évaluation multicritère est une des étapes pour accompagner et soutenir la transition agroécologique en cours. La mise en œuvre d'indicateurs agri-environnementaux au niveau territorial se heurte à un obstacle opérationnel qui est la phase d'acquisition des données sur les pratiques, la description des sols, la végétation voire des données climatiques et ceci que ce soit à des résolutions fines (parcelles, exploitation) ou sur de grandes étendues (département, région ou pays). Le recours à des données satellitaires constitue une piste majeure pour lever ce verrou, notamment avec l'arrivée à partir de 2014 d'une nouvelle génération de satellites à haute résolution d'observation de la terre : les Sentinel. Après un bref état de l'art des possibilités offertes par ces nouveaux satellites, l'article présente les avancées sur le développement d'indicateurs agri-environnementaux calculables au moyen de la télédétection. Un focus est mis sur trois indicateurs dans le cadre du projet H2020 NIVA : bilan carbone, risque de lixiviation des nitrates et biodiversité.

Mots-clés : Bilan carbone, Nitrate, Biodiversité, Indices de végétation, NDVI, Projet NIVA

Abstract: Contribution of remote sensing to the calculation of agri-environmental indicators for the CAP, farmers and stakeholders

The development of multicriteria evaluation methods is one of the steps to support the current agroecological transition. The implementation of agri-environmental indicators at regional scale faces a major obstacle which is the acquisition of data on management, soil description, vegetation, and even climate, at fine resolution (field, farm) and over large areas (region, country). The use of satellite data is a major solution to remove this obstacle, especially with the deployment since 2014 of a new generation of satellites making it possible to observe earth with high-resolution images; the Sentinels. After a short review of the possibilities provided by these new satellites, the article presents the progress on the development of agri-environmental indicators calculable with help of remote sensing. A focus is given on three indicators in the H2020 NIVA project: carbon budget, nitrate leaching and biodiversity.

Keywords: Carbon budget, Nitrate, Biodiversity, Vegetation indices, NDVI, NIVA project

Introduction

Le développement de méthodes d'évaluation multicritère est une des étapes pour accompagner et soutenir la transition agroécologique en cours (Guillou *et al.*, 2013). Ce besoin de méthodes d'évaluation s'exprime à tous les niveaux, depuis la conception de systèmes agricoles innovants jusqu'à l'évaluation des politiques publiques et, notamment, de la PAC. Cela passe par le développement d'indicateurs pertinents et opérationnels. Globalement, il est possible de distinguer (i) des indicateurs de cause, basés sur des variables de pratiques ou de milieu, (ii) des indicateurs d'effet, résultant de calculs de modèle permettant d'estimer un effet en lien avec les pratiques ou le milieu, et (iii) des indicateurs mesurés qui rendent compte des impacts liés aux pratiques agricoles ou autres (Bockstaller *et al.*, 2015). La mise en œuvre de ces indicateurs au niveau territorial se heurte, dans tous les cas, à un obstacle majeur qui est la phase d'acquisition des données sur les pratiques, la description des sols, la végétation voire des données climatiques, que ce soit à des résolutions fines (parcelles, exploitation ou paysage) ou sur de grandes étendues (département, région ou pays).

Depuis plus de 15 ans, les données satellitaires ou les orthophotographies aériennes sont couramment utilisées en agriculture (Bégué *et al.*, 2018 ; Mulla, 2013). Elles permettent déjà la vérification des déclarations des agriculteurs européens exigées par la Politique Agricole Commune (PAC), la modulation des intrants (engrais, produits phytosanitaires) au sein des parcelles, le guidage fin des outils agricoles (ex. semis de précision), le pilotage de l'irrigation, l'estimation des rendements, la détection des adventices... Dans le cadre de la future PAC (2021-2026), l'usage de la télédétection devrait se systématiser. Cette évolution sera rendue possible grâce au lancement entre 2014 et 2017 d'une nouvelle génération de satellites haute résolution d'observation de la terre par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) : les Sentinel.

Dans le cadre de la prochaine PAC, l'usage de la télédétection sera rendu obligatoire pour le suivi des critères d'éligibilité et de conditionnalité des cultures et des pratiques agricoles sur l'ensemble des parcelles de l'Union Européenne (UE). Au-delà de leur usage systématique pour la vérification et de paiement des déclarations PAC (on parle de MRV en anglais, pour Monitoring, Reporting, Verification), les données produites devraient aussi permettre de mesurer l'impact des pratiques agricoles sur l'environnement et le climat. Dans cette perspective, des méthodes de calcul d'indicateurs agri-environnementaux s'appuyant notamment sur l'usage des données Sentinel ont été conçues via une collaboration entre l'Agence de Services et de Paiement¹ (ASP), l'Institut Géographique National (IGN) et trois laboratoires INRAE (CESBIO, DYNAFOR et LAE). Ces méthodes vont être testées sur plusieurs pays dans le cadre du projet européen H2020 NIVA². Sur les 11 indicateurs proposés par ces laboratoires, trois ont été considérés comme étant prioritaires par les Directions Générales (DG) Agri et Climat et par certains Ministères de l'Agriculture de l'UE. Il s'agit des indicateurs bilan carbone, risque de lixiviation des nitrates et biodiversité. Après un bref état de l'art des possibilités offertes par la nouvelle génération de satellites, l'article présentera les avancées sur le développement d'indicateurs agri-environnementaux calculables avec la télédétection.

1. Une nouvelle génération de satellites élargissant les moyens de télédétection

La nouvelle génération de satellites haute résolution d'observation de la terre de ESA est notamment composée de deux satellites radar (Sentinel 1A et 1B) et de deux satellites optiques (Sentinel 2A et 2B) dont les acquisitions d'images sont systématiques et couvrent l'ensemble du globe à haute résolution. Les Sentinel 1A et Sentinel 1B sont munis d'un radar qui permet de recueillir des données par tous les temps, de jour comme de nuit. Cet instrument a une résolution spatiale de 5 m et un champ d'observation

¹ Les décideurs publics (Ministères, collectivités territoriales et établissements publics) font appel à l'Agence de services et de paiement pour les accompagner dans le traitement, le contrôle et le paiement de leurs aides.

² <https://www.niva4cap.eu>

pouvant aller jusqu'à 400 km de large. Leur fréquence de revisite (nouvelle observation d'un même point sur le globe) est de six jours. Les signaux radars des Sentinel 1 sont sensibles à la géométrie et au contenu en eau à la surface. Ils permettent, par exemple, de réaliser un suivi dynamique des biomasses, de l'humidité superficielle du sol ou du travail du sol.

Les Sentinel 2 sont des satellites optiques multi-spectraux qui acquièrent des images dans 13 bandes spectrales du visible à l'infrarouge à des résolutions spatiales de 10 m (visible, proche infrarouge) à 20 m (red-edge, moyen infrarouge) et 60 m (bleu et infrarouge). Leur champ de vision mesure 290 km de large et leur fréquence de revisite est de 10 jours sous les mêmes angles de vision. A des latitudes élevées, toutefois, la couverture des Sentinel 2 se chevauche et certaines régions sont observées tous les 5 jours (voire plus), mais avec des angles de vision différents. Ces satellites offrent un large éventail de services et d'applications dans le domaine agricole (ex. prévision des rendements, modulation des intrants, pilotage de l'irrigation), la gestion des urgences³, la classification de la couverture terrestre (ex. cartographie des cultures) ou le suivi de la qualité de l'eau. Ils permettent aussi de réaliser un suivi dynamique des états de la végétation (taux de couverture du sol, phénologie, indices de végétation...) et du sol (texture, teneur en matière organique...) (Denize *et al.*, 2018 ; Fauvel *et al.*, 2020).

Précision importante, l'accès aux données est ouvert, gratuit et facile (ex. via le portail THEIA⁴). Les données sont également prêtes à l'emploi car corrigées des effets radiométriques, des perturbations atmosphériques, des déformations géométriques liées aux angles d'acquisition. Les nuages ainsi que leurs ombres sont filtrés sur le portail THEIA pour les données optiques grâce aux chaînes de traitement MAJA (Baetens *et al.*, 2019) et WASP⁵

Le projet européen Sentinels for Common Agricultural Policy - SEN4CAP⁶ lancé par l'ESA en collaboration directe avec (et sur demande des) DG Agri, Grow⁷ et du Centre Commun de Recherche (CCR)⁸, mais aussi en collaboration étroite avec plusieurs organismes payeurs européens de la PAC, a permis de développer une chaîne de traitement intégrée permettant de fournir aux instances européennes et nationales de la PAC des produits (données) pertinents pour le suivi des parcelles et la gestion des différentes aides. Cet outil intègre notamment des algorithmes issus des chaînes de traitement MAJA (Baetens *et al.*, 2019) et SEN2AGRI, développées au CESBIO, permettant respectivement d'effectuer les corrections atmosphériques sur les images Sentinel 2 et de réaliser des cartes d'occupation du sol à haute résolution sur de vastes territoires sur la base des données Sentinel (Inglada *et al.*, 2017). La chaîne SEN4CAP, qui est en phase de test sur six pays de l'UE, permettra quant à elle d'automatiser le suivi des pratiques agricoles, l'établissement de rapports et la vérification des déclarations PAC. Ces nouveaux outils devraient contribuer à moderniser et simplifier la PAC et à l'homogénéiser entre Etats membres. Ils devraient aussi permettre d'automatiser les traitements et accélérer le paiement des aides aux agriculteurs.

Aussi, SEN4CAP a développé les outils devant permettre de produire, dès 2021, en temps quasi réel (12 heures après l'acquisition d'image) et sur l'ensemble de l'Europe, des cartes d'indices de végétation (NDVI pour Normalised Difference Vegetation Index, LAI pour Leaf Area Index), des cartes de taux de couverture du sol (FcoverC) et de Fraction de Rayonnement Photosynthétique Absorbé (FAPAR). Les dates de démarrage et fin de cycles de végétation seront estimées via l'utilisation combinée des satellites Sentinel 1 et 2. Ces données seront accessibles via le futur service Copernicus High Resolution Vegetation Phenology and Productivity⁹. De même un autre service Copernicus Land Monitoring Service

³ <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/thematic-areas/emergency-management>

⁴ <https://www.theia-land.fr/ceslist/ces-reflectance-de-surface/> pour la France ou via le site Copernicus <https://scihub.copernicus.eu/> pour l'Europe

⁵ <https://github.com/CNES/WASP>

⁶ <http://esa-sen4cap.org/>

⁷ Direction Générale Marché intérieur, industrie, entrepreneuriat et PME

⁸ Le Laboratoire de recherche scientifique et technique de l'Union européenne

⁹ <https://land.copernicus.eu/pan-european/biophysical-parameters/high-resolution-vegetation-phenology-and-productivity>

High Resolution dédié aux surfaces agricoles devrait voir le jour en 2021. Il fournira sur l'ensemble de l'Europe la cartographie des cultures (en une vingtaine de classes) et des prairies, un suivi des pratiques (ex. date de récolte, travail du sol, présence de cultures intermédiaires, détection des fauches), ainsi qu'une analyse des productivités et de l'effet des événements climatiques sur la production agricole.

2. Indicateurs bilan Carbone

Les indicateurs « carbone » à la parcelle pourront être calculés annuellement via trois approches de complexité croissante (TIER), basées sur une même approche conceptuelle, celle de Smith et al. (2010) définissant le bilan (Equation 1 ; Figure 1).

$$\text{Bilan C} = \text{Flux net annuel de CO}_2 + C_{\text{récolté}} - C_{\text{amendement organique}} \quad (\text{équation 1})$$

TIER 1

TIERs 2 et 3

Figure 1 : Représentation du bilan carbone (Bilan C) en lien avec le calcul de l'indicateur selon trois niveaux de complexité (TIER 1 à 3).

Le bilan C représente la variation de stock de carbone du sol d'une parcelle entre le début et la fin d'une année culturale. Les bilans de C annuels peuvent être cumulés sur plusieurs années pour réaliser des évaluations, à l'échelle, par exemple, d'une rotation complète. Le flux net annuel de CO₂ est considéré comme étant de signe négatif (avec un impact positif sur le climat) lorsqu'une parcelle est un puits de CO₂ atmosphérique. Il résulte des échanges nets de CO₂ entre la parcelle et l'atmosphère induits par les processus de photosynthèse, de respiration de la plante et de respiration des micro-organismes du sol, qui décomposent la matière organique. Ce terme est le plus souvent de signe négatif (puits) pour les grandes cultures. Le terme C_{récolté} représente la quantité de carbone qui est extraite de la parcelle lors de la(des) récolte(s) au cours d'une même année culturale. Cela correspond aux exports totaux de biomasse sous forme de grains, de pailles, de tubercules voire de couverts végétaux récoltés pour servir de fourrage ou pour de la production énergétique. Le terme C_{amendement organique} correspond aux apports annuels de C organique sous forme de fumier, lisier, compost, biochar, etc.

2.1 Méthode TIER 1 pour le calcul du bilan C

La méthode TIER 1 est basée sur une relation empirique linéaire adaptée de Ceschia et al., (2010) reliant durée de couverture végétale active d'une parcelle et sa fixation nette annuelle de CO₂ (voir Figures 2 et 3). La nouvelle relation linéaire ainsi obtenue est applicable à la plupart des grandes cultures à l'exception du riz, dont une partie des émissions de CO₂ sont remplacées par des émissions de méthane. Elle tend à montrer que, plus la durée de couverture annuelle du sol par de la végétation active est longue, et plus la quantité de CO₂ absorbée par la parcelle sera grande. Cette durée de couverture végétale peut être quantifiée très facilement via l'analyse des dynamiques d'indices de végétation (NDVI) calculés à partir des données Sentinel 2 (Araya et al., 2018). Il suffit de comptabiliser le nombre de jours pour lequel le NDVI dépasse un certain seuil. En cas de longues périodes de couverture nuageuse rendant la surface invisible aux satellites Sentinel 2, les signaux radar issus de Sentinel 1 peuvent aussi être utilisés pour détecter les périodes avec ou sans végétation (Veloso et al., 2017). Cette approche souffre toutefois de plusieurs défauts notables : elle ne prend que partiellement en compte les effets climat sur la durée de végétation (ceux qui affectent la durée de végétation) et elle ne prend pas en compte l'intensité de développement de la végétation (quantité de biomasse produite).

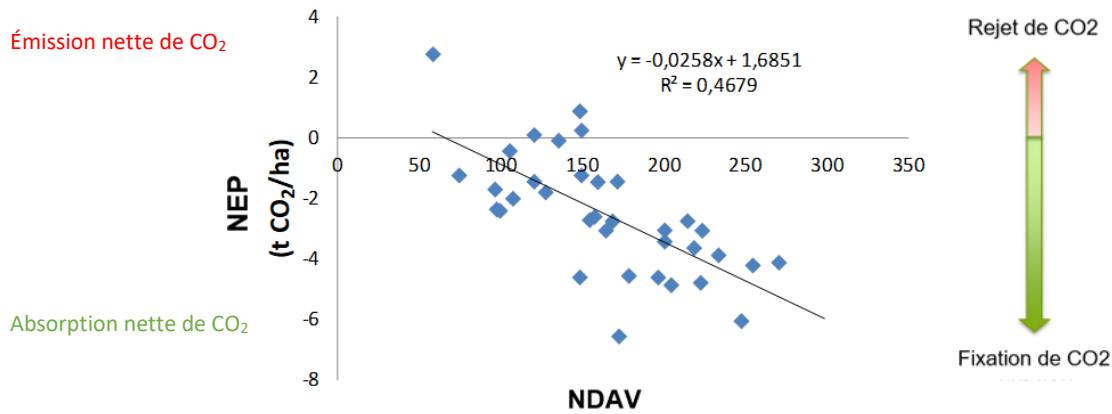


Figure 2 : Flux net annuel de CO₂ mesurés sur 14 parcelles de grandes cultures en Europe (soit 34 années de mesures) en fonction du nombre de jours de couverture du sol par de la végétation active (adapté de Ceschia *et al.*, 2010).

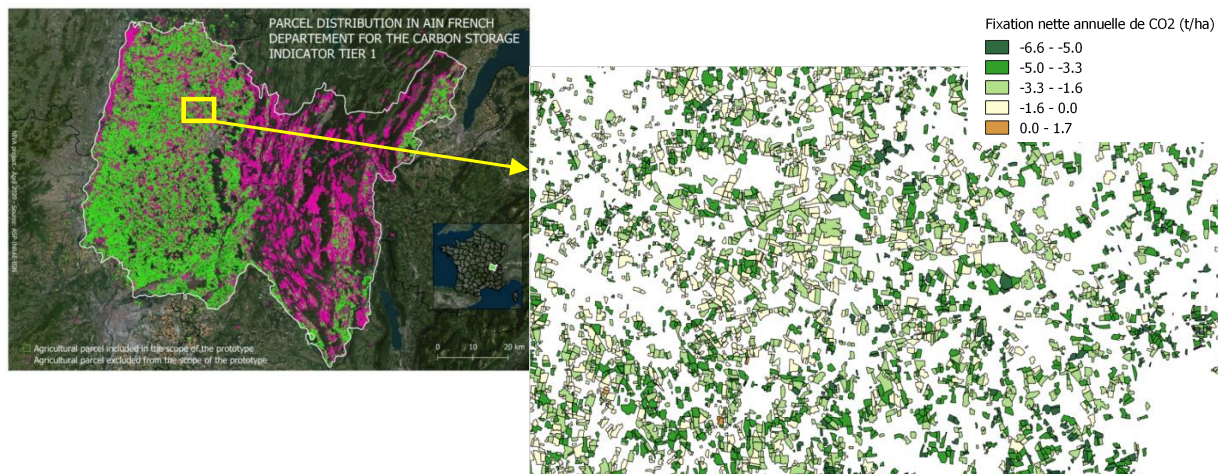


Figure 3 : Exemple de cartographie des flux nets annuels de CO₂ (méthode TIER 1) pour des parcelles de blé d'hiver ou de printemps, d'orge d'hiver ou de printemps, de colza, de betterave à sucre, de pomme de terre, de pois, de tournesol, de sorgho ou de maïs suivis ou non de cultures intermédiaires sur le département de l'Ain en 2017 (Favreau, 2020).

2.2 Méthode TIER 2 pour le calcul du bilan C

La méthode TIER 2 permet d'estimer, via une approche empirique, le bilan de carbone annuel d'une parcelle. Le flux net annuel de CO₂ est estimé via la méthode TIER1 et les quantités de carbone exporté à la récolte (dans le grain, les pailles, les fourrages...) ou apporté sous forme d'amendements organiques sont calculées grâce à des données fournies par les agriculteurs (voir équation 1). La méthode TIER2 se veut donc plus précise que la méthode TIER1 dans la mesure où elle permet de prendre en compte les flux latéraux de carbone. Elle souffre cependant des mêmes défauts que la méthode TIER1 et elle ne permet pas d'attribuer la fraction de biomasse restituée au sol ou apportée sous forme d'amendement organique qui sera minéralisée (et ré-émise sous forme de CO₂) l'année n ou n+1.

2.3 Méthode TIER 3 pour le calcul du bilan C

La méthode TIER 3 est basée sur l'utilisation du modèle agro-météorologique SAFYE-CO₂ (Pique *et al.*, 2020a et b) assimilant des séries temporelles de LAI (indice foliaire) à haute résolution (10m), dérivées des données Sentinel 2. Le modèle permet de calculer quotidiennement les composantes du bilan carbone (biomasse, rendement, flux de CO₂, ...) mais pour seulement trois espèces de cultures de vente (blé, tournesol, maïs pour l'instant) ainsi que pour les cultures intermédiaires. Le modèle peut fonctionner à l'échelle du pixel ou de la parcelle et l'agrégation des données au pas de temps annuel permet de calculer les bilans annuels de carbone. Le modèle détecte automatiquement la présence des cultures intermédiaires, repousses spontanées et adventices durant les intercultures et quantifie leurs impacts sur les flux journaliers de CO₂ ainsi que sur les bilans annuels de carbone. Si une attention particulière a été portée à la quantification précise et réaliste des entrées de C dans le sol via les résidus de cultures, les cultures intermédiaires/repousses/adventices, la composante respiration du sol, qui traduit la vitesse de décomposition de la matière organique, est estimée en revanche via une approche empirique assez simpliste fonction uniquement de la température du sol. Ce choix a été motivé par le fait que les données de propriétés du sol à la parcelle actuellement disponibles via des produits spatialisés (ex. SoilGrids, Global Soil Map) sont encore trop imprécises pour pouvoir les utiliser en entrée d'un modèle de simulation de l'évolution de la matière organique du sol, comme AMG (Clivot *et al.*, 2019) par exemple. Il s'avère qu'un couplage modèle sol/SAFYE-CO₂ apporte une amélioration significative aux simulations spatialisées de bilan C à la parcelle. Une version couplée de SAFYE-CO₂ et AMG sera toutefois prochainement disponible et applicable dans des situations où les propriétés du sol sont précisément renseignées (ex. analyses de sol).

3. Indicateurs de lixiviation de nitrate

L'indicateur « nitrate » se calcule pour une grande majorité de grandes cultures selon deux approches de complexités croissantes (TIER 1 et 2). Ces deux approches prennent en compte un des déterminants majeurs de la lixiviation du nitrate à côté des surplus d'azote liés à la surfertilisation, en l'occurrence la gestion de l'interculture durant la phase de drainage hivernal (De Notaris *et al.*, 2018 ; Padilla *et al.*, 2018). Si les indicateurs basés sur le calcul d'une balance azotée sont les plus populaires, ils ne rendent cependant pas bien compte de la lixiviation du nitrate, notamment en situation de grandes cultures à faible surplus (Bockstaller *et al.*, 2015) et rencontrent de nombreuses difficultés pour un calcul au niveau européen (Klages *et al.*, 2020). Par ailleurs, Buczko et Kuchenbuch (2010) ont recensé une vingtaine d'indicateurs prédictifs sur les émissions d'azote, principalement via les nitrates. Cependant, la majorité de ceux-ci ont besoin de données sur les pratiques de fertilisation. Ces données n'étant pas disponibles au niveau de grandes étendues comme le département, nous avons décidé de nous focaliser sur l'interculture. Par ailleurs, des auteurs ont étudié des corrélations directes entre la lixiviation et un indicateur de végétation NDVI (Zhao *et al.*, 2020). Cependant, ces relations semblent spécifiques au contexte (ex. type de sol) et nécessitent des données supplémentaires.

3.1 Méthode TIER 1 pour le calcul de l'indicateur de lixiviation de nitrate

La méthode TIER 1 est basée sur une notation des effets de la succession, culture précédente / culture en cours sur la lixiviation du nitrate, en s'appuyant sur les connaissances disponibles, sans tenir compte des conditions pédoclimatiques (équation 2).

En effet, la culture, de par les résidus laissés au sol et leur minéralisation, contribue au risque de lixiviation. Par ailleurs, elle ne capte qu'une partie plus ou moins grande de la minéralisation annuelle du sol qui vient aussi augmenter la quantité soumise au drainage. Cependant, si une culture intermédiaire ou une culture d'hiver est implantée, celle-ci absorbera tout ou partie de l'azote minéral du sol ce qui diminuera d'autant la quantité d'azote minéral susceptible d'être entraînée par les eaux de drainage.

L'indicateur sera égal à la différence entre le terme estimant la minéralisation des résidus de la culture précédente et de la matière organique du sol avec le terme estimant l'absorption avant l'hiver par la culture ou interculture suivante. En nous basant sur des données de modélisation, nous avons apporté une pondération à la minéralisation du sol plus contributive que celle liée aux résidus de récolte (équation 3).

$$Ind_{NO3} = 1 - N_{min} - N_{abs} \quad (\text{équation 2})$$

avec :

Ind_{NO3} : l'indicateur de lixiviation exprimé entre 0 (lixiviation élevée) et 1 (lixiviation nulle),

N_{min} : Note exprimant le potentiel de minéralisation des résidus de récolte et de la matière organique du sol.

N_{abs} : note exprimant le potentiel d'absorption de la culture de l'année et de la culture intermédiaire (les deux sont sommées), exprimées entre 0 (absorption nulle) et 1 (absorption élevée).

$$N_{min} = N_{res} + 2 \times N_{sol} \quad (\text{équation 3})$$

avec :

N_{res} , note estimant le potentiel de minéralisation (ou de réorganisation) des résidus

N_{sol} note estimant le potentiel de minéralisation de la matière organique du sol. Le facteur de pondération est basé sur l'expertise et les résultats de modélisation obtenu avec l'indicateur I-N3 d'INDIGO (Bockstaller et al., en préparation). Toutes les notes sont exprimées entre 0 (minéralisation faible) et 1 (minéralisation élevée).

Dans le cas de l'implantation d'une culture intermédiaire, le calcul sera effectué à la fois pour la succession culture/culture intermédiaire et culture intermédiaire/culture suivante en gardant la durée de la rotation (voir exemple dans le Tableau 1 pour la succession).

Le paramétrage a été réalisé à partir d'études de lixiviation (p. ex. Beaudoin *et al.*, 2005 ; Sieling *et al.*, 1999 ; Vertès *et al.*, 2010). Le tableau donne des résultats pour des rotations courantes pratiquées en France dont la monoculture de maïs, les rotations blé/maïs grain ou colza/blé/orge. Pour les successions avec des retournements de prairies, nous avons étendu l'échelle entre 0 et 2 pour N_{min} afin de prendre en compte les valeurs élevées de minéralisation pour ces systèmes (Vertès *et al.*, 2010).

Concrètement, l'information sera donc collectée sur chaque parcelle à cheval sur deux années (de juin à juin) pour avoir les deux cultures principales de la succession à partir du Registre Parcellaire Graphique de la PAC (RPG). Pour pallier le défaut d'information relatif aux CIPAN (Cultures Intermédiaires Pièges à Nitrates) ou aux CIMS (Cultures Intermédiaires Multi Services), il sera fait appel à la télédétection pour estimer un potentiel d'absorption d'azote de ces couverts. Un maximum de l'indice de végétation NDVI durant la période considérée sera utilisé pour identifier le pic de développement de la végétation en termes de biomasse pour le transformer ensuite en une classe d'absorption des nitrates. En reliant des valeurs de NDVI à des quantités de biomasses, il serait possible d'utiliser le seuil de 2 t MS/ha comme seuil proposé par Zhao *et al.* (2020), au-dessus duquel, la lixiviation devient faible.

Tableau 1 : Exemple de calcul de l'indicateur lixiviation nitrate (Ind_{NO3}). Voir l'équation 2 pour la signification des sigles et des valeurs.

Succession		Paramètres		Résultats	
Année n	Année n+1	N _{min} 0 : valeur nulle 1: valeur élevée	N _{abs} 0 : valeur nulle 1: valeur élevée	Ind _{NO3} 0 : risque élevé (défavorable) 1: risque faible (favorable)	Moyenne sur la rotation*
Maïs grain	Blé	0,50	0,10	0,60	
Blé,	Maïs grain	0,63	0,00	0,37	0,48
Maïs grain	Maïs grain	0,50	0,00	0,50	0,50
Colza**	Blé**	0,75	0,10	0,35	
Blé	Orge**	0,63	0,10	0,47	
Orge	Colza	0,63	0,50	0,87	0,56
Maïs grain	Blé	0,50	0,10	0,60	
Blé	Mo***	0,63	0,60	0,97	
Mo***	Maïs grain	0,10	0,00	0,90	0,73
Maïs grain	Blé	0,50	0,10	0,60	
Blé,	Colza	0,63	0,50	0,87	
Colza	Blé	0,75	0,10	0,35	
Blé,	Mo***	0,63	0,67	0,97	
Mo***	Maïs grain	0,10	0,00	0,90	0,87

* calculée par la formule : $1 - \text{Somme}(\text{Nmin} - \text{Nabs}) / \text{durée rotation}$

** : colza, orge et blé tendre d'hiver

*** Moutarde (culture intermédiaire piège à nitrates)

3.2 Méthode TIER 2 pour le calcul de l'indicateur de lixiviation de nitrate

Pour la méthode TIER2, il est prévu de pondérer le résultat obtenu par TIER1 par des facteurs prenant en compte 1) le niveau de drainage et 2) le potentiel de minéralisation du sol qui viendrait pondérer le terme N_{sol} de l'équation 3. Le premier facteur pourrait être calculé à partir de données climatiques et une carte des réserves utiles, elles-mêmes estimées à partir des propriétés du sol et le second à partir des propriétés du sol et de l'équation de minéralisation de Clivot *et al.* (2017).

L'équation générale serait : $\text{Ind}_{\text{NO}_3} = 1 - (\text{N}_{\text{res}} + (\text{c}_{\text{ms}} * 2 * \text{N}_{\text{sol}}) - \text{N}_{\text{abs}}) * \text{c}_{\text{dr}}$ (équation 4)

avec :

N_{res}, N_{sol}, N_{abs} : voir équations 2 et 3

c_{ms} : facteur de pondération de la minéralisation du sol en fonction des propriétés du sol entre 0 (nulle) et 1 (élevée)

c_{drs} : facteur de pondération du niveau de drainage en fonction des propriétés du sol entre 0 (nul) et 1 (élevé)

Il est à noter que l'estimation du N_{abs} sera affinée pour les cultures intermédiaires (CIPAN ou CIMS) grâce à l'utilisation d'informations du FMIS (Farm Management Information System, ou système de gestion des données agricoles) sur la composition en espèce des couverts de cultures intermédiaires.

3.3 Méthode TIER 3 pour le calcul de l'indicateur de lixiviation de nitrate

Comme pour la question du carbone, un modèle de simulation des pertes pourrait être utilisé à un niveau parcellaire sur de grandes étendues. Ceci a été fait avec le modèle STICS (Brisson *et al.*, 2003) au niveau de la zone de grandes cultures en France pour l'étude EFESE sur la cartographie des services écosystémiques (Tibi et Therond, 2017). D'autres modèles demandant moins de données AqYield N (Tribouillois *et al.*, 2020), Syst'N (Parnaudeau *et al.*, 2012) ou I-N3 d'INDIGO (Bockstaller *et al.*, en préparation) pourraient aussi être candidats. Des tests de comparaison seraient nécessaires au préalable. Dans tous les cas, des données pédoclimatiques et relatives aux itinéraires techniques seraient requises.

4. Indicateurs de biodiversité

La biodiversité peut être définie comme la diversité du monde vivant à tous les niveaux d'organisation (gènes, espèces, communautés, écosystèmes). C'est donc un élément complexe avec de multiples facettes et, par conséquent, difficile à caractériser. L'acception la plus intuitive et la plus commune de la biodiversité est la diversité des espèces. C'est donc à partir de cette caractérisation de la biodiversité que nous avons développé nos indicateurs.

Dans les milieux agricoles, la diversité des espèces dépend des pratiques au sein des parcelles agricoles et de la structure des paysages agricoles (Batáry *et al.*, 2011). Plus précisément, la structure des paysages influence la biodiversité à la fois par la nature des éléments qui les composent (par ex. cultures, prairies, forêts) et par leur distribution dans l'espace (par ex. la taille des parcelles). En effet, certaines espèces sont plus ou moins sensibles aux perturbations engendrées par les pratiques agricoles (par ex. travail du sol, pesticides). Certaines espèces sont fortement associées à certains types d'occupation du sol (ex. forêt, prairie, céréales). D'autres espèces encore ont besoin d'une diversité de ressources qui se trouve dans des milieux distincts. Ainsi, les pollinisateurs ont besoin à la fois d'un site de nidification dans le sol qui ne soit pas perturbé (souvent dans les prairies ou les forêts) mais aussi d'une diversité de ressources florales tout au long de l'année, donc de prairies diversifiées ou d'une diversité de cultures associées à des phénologies étalées. Le rôle de ces différents facteurs varie en fonction des espèces et des groupes taxonomiques considérés. Il est donc impossible d'identifier une unique espèce ou un unique groupe taxonomique qui puisse servir d'indicateur pour l'ensemble de la biodiversité (Billeter *et al.*, 2008).

Les indicateurs « biodiversité » que nous développons dans le cadre du projet NIVA ont pour ambition de refléter un ensemble d'espèces de différents groupes taxonomiques. Ils visent donc à prendre en compte à la fois les pratiques et la structure des paysages. De ce fait, et contrairement aux indicateurs précédents, les indicateurs « biodiversité » sont calculés au niveau du paysage et non de la parcelle. D'un point de vue écologique, l'étendue spatiale d'un paysage peut varier en fonction des espèces étudiées, notamment en fonction du degré de mobilité des espèces dans l'espace. Les écologues ont testé différentes étendues pour l'étude de la distribution d'espèces ou groupes taxonomiques au sein des paysages agricoles. L'étendue de 1 km correspond à un compromis satisfaisant entre les étendues des paysages pertinentes pour différentes espèces. C'est donc cette étendue, fréquemment retrouvée dans la bibliographie (Batáry *et al.*, 2011 ; Billeter *et al.*, 2008 ; Sirami *et al.*, 2019) que nous avons retenue. Il est par ailleurs possible de calculer les variables de paysage au sein d'un cercle ou d'un carré. Nous avons choisi d'appliquer le calcul à des carrés de 1km par 1km pour des raisons de simplicité de calcul et de cohérence avec le mode de calcul du FarmLand Bird Index (Gregory *et al.*, 2005) qui est l'un des indicateurs d'impact en termes de biodiversité retenu par la Commission Européenne pour la future PAC.

L'abondante littérature en écologie montre que les principales composantes de la structure des paysages qui influencent la diversité des espèces sont les suivantes : les milieux semi-naturels (proportion et diversité) et l'hétérogénéité de la mosaïque agricole (diversité des cultures, prairies permanentes, taille

des parcelles). Les indicateurs « biodiversité » que nous développons dans le projet NIVA sont donc basés sur l'approche conceptuelle suivante :

$$\text{Biodiversité} = \text{Milieux semi-naturels} + \text{Mosaïque agricole} + \text{Pratiques} \quad (\text{équation 5})$$

Ces trois composantes correspondent aux trois critères pris en compte dans la définition des trois grands types d'Agriculture à Haute Valeur Naturelle (HVN) : proportion élevée de végétation semi-naturelle, forte diversité du couvert végétal et extensivité des formes d'agriculture (Cooper *et al.*, 2007). Jusqu'ici, la traduction de ces critères en un indicateur qui couvre l'ensemble des types d'agriculture et puisse être calculé régulièrement et à une échelle spatiale fine s'est heurtée au manque de disponibilité des données adéquates pour estimer ces trois composantes. La mise à disposition des données des déclarations PAC et des données issues des satellites Sentinel ouvre de nouvelles perspectives.

Ces trois composantes peuvent être caractérisées avec plus ou moins de détail par différentes variables, selon les données disponibles, de façon à prendre en compte plus ou moins de gradients qui favorisent la biodiversité au sein des paysages agricoles (Figure 4). Nous proposons deux niveaux d'indicateurs sur la base de cette décomposition des gradients.

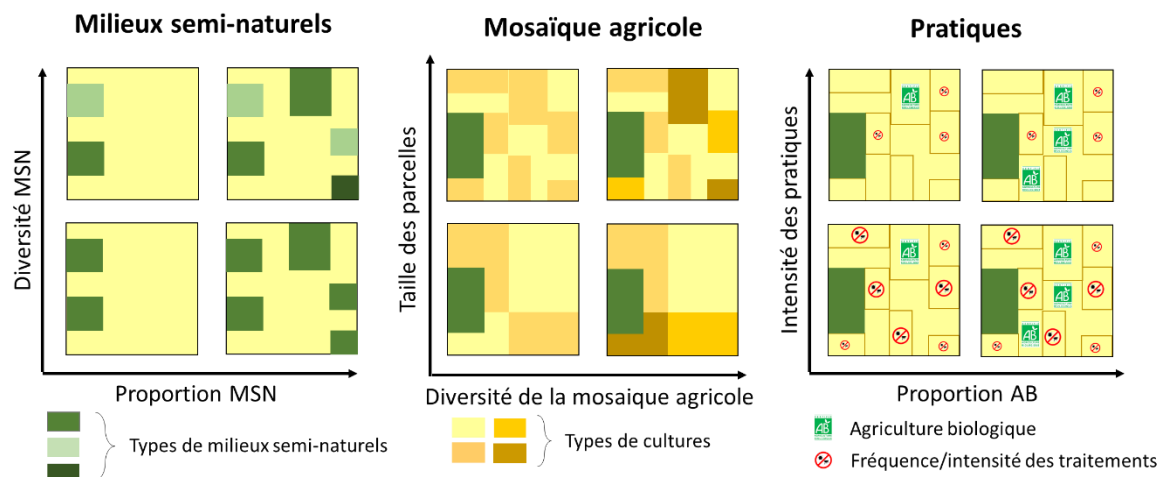


Figure 4 : Illustration des trois composantes des paysages agricoles hébergeant une biodiversité élevée, et dont découlent les différents modes de calcul de l'indicateur biodiversité développé dans le cadre du projet NIVA.

Nous proposons de développer ces indicateurs biodiversité sur la base des résultats du projet européen FarmLand¹⁰ qui a testé le rôle de l'hétérogénéité des cultures pour la biodiversité des paysages agricoles à travers huit régions d'Europe et d'Amérique du Nord. Dans le cadre de ce projet, des observations ont été recueillies dans 1305 parcelles cultivées, situées dans 435 paysages agricoles de 1 km² dont la taille moyenne des parcelles, la diversité des cultures et la proportion de milieux semi-naturels variaient de façon indépendante. Les chercheurs ont identifié plus de 167 000 individus de 2795 espèces appartenant à 7 groupes taxonomiques (oiseaux, papillons, abeilles, syrphes, araignées, carabes et plantes). Ils ont ensuite calculé un indice synthétique regroupant les informations sur ces 7 groupes taxonomiques afin d'estimer la biodiversité de chacun des 435 paysages étudiés. Les chercheurs ont ainsi montré, pour la première fois à une telle échelle géographique, qu'augmenter la complexité de la mosaïque des cultures est aussi bénéfique pour la biodiversité qu'augmenter la proportion de milieux semi-naturels (Sirami *et al.*, 2019). Ils ont ainsi construit un modèle qui permet d'établir la relation entre la proportion de milieux

¹⁰ www.farmland-biodiversity.org

semi-naturels, la taille des parcelles, la diversité des cultures et la biodiversité des paysages agricoles. Ils ont également exploré le rôle de la proportion de prairies, de l'intensité des pratiques ou encore de la longueur des haies. Ce projet a montré que l'effet de ces différents facteurs est relativement similaire dans des régions agricoles contrastées : Armorique, Camargue, Coteaux de Gascogne et Plaine et Val de Sèvre (en France), East Anglia (en Angleterre), Göttingen (en Allemagne), Lleida (en Espagne) et Eastern Ontario (au Canada). C'est donc sur l'adaptation de ces modèles que nous proposons de développer les deux niveaux d'indicateurs suivants.

Ces modèles ayant été développés à partir de données recueillies dans des paysages agricoles avec moins de 40% de milieux semi-naturels et avec une dominance de terres arables, c'est donc sur ces paysages que nous proposons d'appliquer les indicateurs biodiversité dans un premier temps. L'application de ces indicateurs à des paysages agricoles dominés par les prairies permanentes pourra être explorée dans un second temps.

4.1 Méthode TIER 1 pour le calcul de l'indicateur de biodiversité

La méthode TIER 1 est basée sur le modèle intégrant la proportion de milieux semi-naturels, la diversité des cultures, la proportion de prairies, la taille des parcelles et la proportion d'agriculture biologique dans le paysage.

La proportion de milieux semi-naturels est obtenue par soustraction des surfaces artificialisées au sein de chaque paysage par satellite (ou bases nationales existantes) et des surfaces agricoles via les données PAC (RPG). La taille des parcelles, la diversité des cultures, la proportion de prairies et la proportion d'agriculture biologique sont obtenus via les déclarations PAC. Le modèle issu du projet FarmLand ne prenait pas en compte les cultures intermédiaires. Nous explorons actuellement la possibilité d'intégrer ces données.

Cet indicateur étant basé sur des données satellite et des données PAC facilement accessibles, il peut donc être calculé dans tous les États membres de l'Europe.

4.2 Méthode TIER 2 pour le calcul de l'indicateur de biodiversité

La méthode TIER 2 est basée sur le modèle intégrant les variables précédentes en y ajoutant une variable sur la diversité des milieux semi-naturels. Cette donnée nécessite une bonne cartographie des milieux semi-naturels surfaciques et linéaires. La méthode TIER 2 doit donc à la fois prendre en compte les données du RPG pour identifier les Surfaces Non Agricoles (SNA) utiles au calcul, notamment avec les Surfaces d'Intérêt Écologiques (SIE), mais aussi intégrer d'autres bases de données de références de l'IGN qui décrivent les éléments topographiques des territoires en dehors des exploitations agricoles. Or, les agriculteurs ne sont pour l'instant pas obligés de déclarer tous ces éléments. Nous explorons également une méthode TIER 2+, qui permettrait de prendre en compte l'intensité des pratiques agricoles et, notamment, la fréquence et l'intensité des pesticides appliqués dans les parcelles. En effet, la nocivité des pesticides, notamment les néonicotinoïdes, sur la biodiversité est de plus en plus démontrée par les études scientifiques (Humann-Guillemot *et al.*, 2019). C'est donc un enjeu crucial de mieux les prendre en compte dans les indicateurs de biodiversité appliqués aux paysages agricoles. La Banque Nationale des Ventes des distributeurs (BNV-d) au niveau communal pourrait être utilisée comme source de données sur la pression pesticides.

Ces indicateurs de biodiversité ont pour objectif principal d'évaluer le potentiel des paysages agricoles à héberger une richesse spécifique élevée pour la majorité des groupes taxonomiques. Mais ils peuvent également être considérés comme des proxy pour des services écosystémiques. En effet, il a été montré que le niveau de biodiversité est fortement corrélé aux niveaux de plusieurs services écosystémiques associés. Le projet FarmLand a ainsi contribué à montrer qu'en favorisant les auxiliaires

des cultures, augmenter l'hétérogénéité des paysages agricoles contribue à augmenter le contrôle biologique et la pollinisation (Bosem Baillod *et al.*, 2017 ; Hass *et al.*, 2018), deux services qui contribuent au rendement. Une augmentation de l'hétérogénéité des paysages agricoles et de la biodiversité est également associée à une augmentation des services culturels, notamment en termes de valeur esthétique des paysages et de biodiversité remarquable.

Bien que le calcul de l'indicateur de biodiversité soit pensé et développé au niveau du paysage (un carré de 1km x 1km), nous proposons d'appliquer ce calcul au niveau de l'exploitation agricole. Il convient évidemment de garder en tête que le calcul sur cette étendue spatiale ne permettra pas d'estimer la biodiversité associée à l'exploitation agricole puisque les parcelles de l'exploitation ne sont pas forcément disposées les unes à côté des autres et ne constituent donc pas un paysage. Ce calcul permettra cependant d'estimer la contribution potentielle de l'exploitation agricole au maintien de la biodiversité au sein du/des paysages dans lequel/lesquels elle se trouve. Il permettra à l'agriculteur d'évaluer le potentiel de sa ferme à fournir les services écosystémiques associés à la biodiversité qui contribuent à augmenter les rendements ou qui sont pertinents pour la société. Il permettra également de mieux valoriser les initiatives qui mettent en place des approches collectives au niveau du territoire.

5. Discussion

L'arrivée de la nouvelle génération de satellites Sentinel permet d'envisager sans aucun doute des changements profonds dans l'organisation de la nouvelle PAC en élargissant les possibilités de collecte et de traitement automatique de données. Ces progrès sont permis par des satellites équipés par des instruments plus performants et notamment de radars qui permettent d'avoir des images même les jours de couverture nuageuse. Ces outils s'ajoutent à ceux de l'agriculture de précision (carte de rendements et autres capteurs, données fournies par les drones). Un défi majeur sera de connecter ces différents flux d'information.

L'utilité de ces nouveaux outils est indéniable à des fins de suivi de la PAC. Les agriculteurs seront allégés du fardeau de remplir certains formulaires et pourront bénéficier d'un paiement plus rapide des aides. En revanche, au niveau de la Commission Européenne, les effets en termes de coûts de transaction sont encore à évaluer car le déploiement de ces outils aura des impacts, notamment financiers. Malgré ces avantages, cette mise en place d'outils de suivi très puissants et systématiques des parcelles peut aussi susciter de nombreuses réticences et craintes chez les agriculteurs même si elles peuvent aussi servir la gestion technique et économique de leur exploitation. Cette manne de données étant publique, son exploitation sera un enjeu clé et pourrait conduire à une amplification de l'agribashing.

Cependant, les outils de suivi automatique auront un périmètre limité et pourront aussi être faillibles. Dans tous les cas, il restera encore de l'information à collecter chez les agriculteurs. Cette information devra être vérifiable sur le terrain en cas d'enjeu financier. Le risque de fraude existe comme cela a été observé avec l'utilisation du calcul de bilan azoté au Pays-Bas (Oenema *et al.*, 2003).

Les outils de télédétection permettront d'avoir dans les prochaines années des informations sur l'état des cultures (le degré d'implantation et *a contrario* le pourcentage de sol nu), le type de travail du sol (labour ou non), les dates de semis et de récolte. Cependant, des informations sur les pratiques de fertilisation et de protection des cultures, (produits, dates, quantités) seront toujours à fournir par les agriculteurs. Dans le projet NIVA, d'autres méthodes de collecte sont aussi testées pour compléter le suivi automatique des parcelles par satellite. Il s'agit par exemple de la communication d'information par photos géoréférencées prises par l'agriculteur sur son smartphone permettant d'attester d'un acte technique sur la parcelle, d'une culture atypique, d'un aléa climatique, ... ou encore de l'intégration de données enregistrées par les engins agricoles et les matériels de précision dans les bases de données des agences de paiement en vue de justifier des travaux réalisés (ou non) dans les parcelles.

L'utilisation de ces informations pour calculer des indicateurs agri-environnementaux, tels que ceux qui sont présentés dans cet article, ouvre de nouvelles perspectives à l'utilisation de l'information recueillie auprès des agriculteurs et pourrait venir soutenir le paiement pour services environnementaux. Cette notion de services va plus loin qu'une simple compensation pour pertes de rendements et peut donner un nouveau sens social au métier d'agriculteur (Burton et Paragahawewa, 2011). Ces paiements ne viendront pas seulement de la PAC mais aussi d'acteurs privés. Les indicateurs bilan carbone présentent certainement le plus grand intérêt dans le cadre actuel de la compensation carbone pour les entreprises privées ou publiques. L'initiative Label Bas Carbone (LBC) en cours de déploiement en agriculture en est l'illustration¹¹. Il est à noter que les projets labellisés devront aussi faire preuve d'absence d'impacts collatéraux qui pourraient être estimés par des indicateurs tels ceux de lixiviation de nitrate ou de biodiversité.

Les indicateurs présentés dans cet article sont des indicateurs d'effet mesurés prédictifs selon la typologie de Bockstaller *et al.*, (2015) assimilables à des indicateurs de « résultats » bien que la notion de résultat ne soit pas toujours clairement distinguée des « moyens » ou de pratiques (Bonvillain *et al.*, 2020). Ce ne sont pas seulement des indicateurs de cause ou de pression, comme l'IFT ou la quantité d'azote apportée qui sont des faibles prédicteurs des impact environnementaux (Uthes *et al.*, 2019). Certes, les indicateurs de TIER 1 présentent certainement une incertitude élevée mais peuvent être au moins utilisés en relatif ou pour évaluer un impact potentiel. Ceci est illustré par l'indicateur nitrate TIER1, qui ne prend pas en compte les données pédoclimatiques, ou par l'indicateur de biodiversité TIER1, qui se limite à tenir compte de la proportion de parcelles en agriculture biologique pour tenir compte des pratiques. C'est pourquoi, les exigences pour le LBC sont plutôt du niveau TIER3 pour les modèles de carbone. À un certain niveau, les données sols sont indispensables et pourront constituer un nouveau goulet d'étranglement pour les données à résolution parcellaire sachant que des données existent au niveau national mais à des mailles plus grossières, comme la Base de Données Géographique des Sols de France d'INRAE au 1/1000000^e ou la base de données météo SAFRAN, utilisées dans l'étude EFESSE pour mettre en œuvre le modèle STICS (Tibi et Therond, 2017) ou le modèle SAFYE-CO2 (indicateur C TIER3). Cela nécessitera des études complémentaires pour voir dans quelle mesure les résultats seront affectés par ce manque de précision des données pédologiques. Cependant, l'acquisition de données sol à haute résolution spatiale est envisagée par certains auteurs via l'utilisation de données satellitaires Sentinel (Vaudour *et al.*, 2019).

Le projet NIVA se focalise sur trois indicateurs prioritaires pour la Commission Européenne, représentatifs d'impacts majeurs de l'agriculture puisqu'en lien avec des dépassements de limites planétaires (pour la biodiversité et le nitrate) ou en passe de l'être pour le carbone (Campbell *et al.*, 2017). D'autres indicateurs ont été envisagés, par exemple pour l'érosion, qui a déjà fait l'objet de calculs au niveau européen (Panagos *et al.*, 2015b). Dans sa version TIER1, il pourrait se centrer sur le calcul du facteur lié à la couverture du sol, le C factor (Panagos *et al.*, 2015a).

À ceci pourrait s'ajouter un indicateur sur l'impact visuel de la gestion de l'espace agricole à partir d'indices paysagers (Bailey *et al.*, 2007). Néanmoins, un tel indicateur ne pourrait se calculer au niveau de l'exploitation agricole en raison de parcelles éclatés. Par ailleurs, une série de six indicateurs est envisagée pour estimer les services écosystémiques rendus par la rotation aux agriculteurs : structuration des sols, régulations des bioagresseurs (adventices, maladies, ravageurs), fourniture d'azote par le sol et pollinisation. Dans l'état actuel des connaissances (voir par exemple la revue de Palomo-Campesino *et al.* (2018)), une approche similaire à celle utilisée pour l'indicateur NO₃ est envisagée (Keichinger *et al.*, en préparation). Ces indicateurs seront destinés prioritairement aux agriculteurs et à leurs conseillers. Enfin, d'autres indicateurs pourraient présenter un intérêt comme le suivi de l'albédo des surfaces agricoles, car cette variable a un impact sur la contribution de l'agriculture aux changements climatiques

¹¹ <https://www.ecologie.gouv.fr/label-bas-carbone>

et sa gestion via des changements de pratiques contribuerait significativement à les atténuer (Carrer *et al.*, 2018).

Dans l'état actuel des travaux, le NDVI constitue l'indice de végétation central utilisé dans nos calculs. D'autres indices sont disponibles et ont été comparés tels le Ratio Vegetation Index (RVI) et le Ratio Red Edge (RRE). Dans l'étude de Zhao *et al.* (2020), le NDVI ressortait en termes de corrélation comme le meilleur prédicteur mais présentait le plus de « bruit ». De telles études devront être approfondies dans les prochaines années. Il est possible que la combinaison d'indices issus de l'optique avec des indices issus du radar apportera des améliorations substantielles à la qualité prédictive.

Conclusions

La mise sur orbite d'une nouvelle constellation de satellites a ouvert de nouvelles perspectives à l'utilisation de données issues de la télédétection, non seulement pour la mise en œuvre de la PAC mais aussi pour le calcul d'indicateurs agri-environnementaux. L'article en présente trois, développés dans le cadre du projet H2020 NIVA (bilan carbone, lixiviation du nitrate et biodiversité), sachant que d'autres sont envisagés dans les prochaines années (ex. risque d'érosion). De tels indicateurs pourront intéresser la profession agricole au-delà de l'aspect contrôle de la PAC qui serait plutôt source de craintes. En effet, ces indicateurs pour le niveau TIER 3 pourraient être utilisés pour le service de paiements environnementaux. La disponibilité de données sols et climatiques à haute résolution pourrait constituer un goulet d'étranglement dont il faudra étudier les conséquences sur la précision des calculs. Par ailleurs, l'apport d'autres indices de végétation en plus du NDVI ou des données satellitaires radar devra être étudié.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Union Européenne pour le financement des projets H2020 NIVA, DiverIMPACTS et le GIS « Grande Culture à Hautes Performances Économiques et Environnementales » (GC HP2E) pour son soutien.

Références bibliographiques

- Araya S., Ostendorf B., Lyle G., Lewis M., 2018. CropPhenology, An R package for extracting crop phenology from time series remotely sensed vegetation index imagery. *Ecological Informatics* 46, 45-56.
- Baetens L., Desjardins C., Hagolle O., 2019. Validation of Copernicus Sentinel-2 Cloud Masks Obtained from MAJA, Sen2Cor, and FMask Processors Using Reference Cloud Masks Generated with a Supervised Active Learning Procedure. *Remote Sensing* 11, 433.
- Bailey D., Herzog F., Augenstein I., Aviron S., Billeter R., Szerencsits E., Baudry J., 2007. Thematic resolution matters, Indicators of landscape pattern for European agro-ecosystems. *Ecological Indicators* 7, 692-709.
- Batáry P., Báldi A., Kleijn D., Tschamntke T., 2011. Landscape-moderated biodiversity effects of agri-environmental management, a meta-analysis. *Proceedings of the Royal Society B, Biological Sciences* 278, 1894-1902.
- Beaudoin N, Saad J.K., Van Laethem C., Machet J.M., Maucorps J., Mary B., 2005. Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France, Effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agriculture Ecosystems and Environment* 111, 292-310.
- Bégué A., Arvor D., Bellon B., Betbeder J., de Aballeyra D.P.D. Ferraz R., Lebourgeois V., Lelong C., Simões M, R. Verón S., 2018. Remote Sensing and Cropping Practices, A. Review. *Remote Sensing* 10, 99.

- Billeter R., Liira J., Bailey D., Bugter R., Arens P., Augenstein I., Aviron S., Baudry J., Bukacek R., Burel F., et al., 2008. Indicators for biodiversity in agricultural landscapes, a pan-European study. *Journal of Applied Ecology* 45, 141-150.
- Bockstaller C., Feschet P., Angevin F., 2015. Issues in evaluating sustainability of farming systems with indicators. *Oléagineux Corps gras Lipides* 22.
- Bonvillain T., Foucherot C., Bellassen V., 2020. L'obligation de résultats environnementaux verdira-t-elle la PAC? Comparaison des coûts et de l'efficacité de six instruments de transition vers une agriculture durable
- Bosem Baillood A., Tschardt T., Clough Y., Batáry P., 2017. Landscape-scale interactions of spatial and temporal cropland heterogeneity drive biological control of cereal aphids (L. Marini, Éd). *Journal of Applied Ecology* 54, 1804-1813.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., 2003. An overview of the crop model STICS. *European Journal of Agronomy* 18: 309-332.
- Buczko U., Kuchenbuch R.O., 2010. Environmental Indicators to Assess the Risk of Diffuse Nitrogen Losses from Agriculture. *Environmental Management* 45, 1201-1222.
- Burton R.J.F., Paragahawewa U.H., 2011. Creating culturally sustainable agri-environmental schemes. *Journal of Rural Studies* 27, 95-104.
- Campbell B.M., Beare D.J., Bennett E.M., Hall-Spencer J.M., Ingram J.S.I., Jaramillo F., Ortiz R., Ramankutty N., Sayer J.A., Shindell D., 2017. Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries. *Ecology and Society* 22, art8.
- Carrer D., Pique G., Ferlicoq M., Ceamanos X., Ceschia E., 2018. What is the potential of cropland albedo management in the fight against global warming? A case study based on the use of cover crops. *Environmental Research Letters* 13, 044030.
- Ceschia E., Béziat P., Dejoux J.F., Aubinet M., Bernhofer C., Bodson B., Buchmann N., Carrara A., Cellier P., Di Tommasi P., et al., 2010. Management effects on net ecosystem carbon and GHG budgets at European crop sites. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 139, 363-383.
- Clivot H., Mary B., Valé M., Cohan J.-P., Champolivier L., Piraux F., Laurent F., Justes E., 2017. Quantifying in situ and modeling net nitrogen mineralization from soil organic matter in arable cropping systems. *Soil Biology and Biochemistry* 111, 44-59.
- Clivot H., Mouny J.-C., Duparque A., Dinh J.-L., Denoroy P., Houot S., Vertès F., Trochard R., Bouthier A., Sagot S., et al., 2019. Modeling soil organic carbon evolution in long-term arable experiments with AMG model. *Environmental Modelling & Software* 118, 99-113.
- Cooper T., Arblaster K., Baldock D., Farmer M., Beaufoy G., Jones G., Poux X., McCracken D., Bignal E., Elbersen B. et al., 2007. Final report for the study on HNV indicators for evaluation. Contract notice 2006 – G4-04. Report prepared by the Institute for European Environmental Policy for DG Agriculture.
- Denize J., Hubert-Moy L., Betbeder J., Corgne S., Baudry J., Pottier E., 2018. Evaluation of Using Sentinel-1 and -2 Time-Series to Identify Winter Land Use in Agricultural Landscapes. *Remote Sensing* 11, 37.
- Fauvel M., Lopes M., Dubo T., Rivers-Moore J., Frison P.L., Gross N., Ouin A., 2020. Prediction of plant diversity in grasslands using Sentinel-1 and -2 satellite image time series. *Remote Sensing of Environment* 237, 111536.
- Favreau A., 2020. Développement d'un prototype de calcul du flux net annuel de CO₂ à la parcelle - Projet NIVA. Rapport de stage soutenu le 10/11/2020 dans le cadre des Cycle des ingénieurs diplômés de l'ENSG, 3^{ème} année.
- Gregory R.D., van Strien A., Vorisek P., Gmelig Meyling A.W., Noble D.G., Foppen R.P.B., Gibbons D.W., 2005. Developing indicators for European birds. *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* 360, 269-88.
- Guillou M., Guyomard H., Huyghe C., Peyraud J.-L., 2013. Vers des agricultures doublement performantes pour concilier compétitivité et respect de l'environnement. Propositions pour le Ministre. Agreenium, INRA.

- Hass A.L., Kormann U.G., Tschardt T., Clough Y., Baillod A.B., Sirami C., Fahrig L., Martin J.-L., Baudry J., Bertrand C., et al., 2018. Landscape configurational heterogeneity by small-scale agriculture, not crop diversity, maintains pollinators and plant reproduction in western Europe. *Proceedings of the Royal Society B, Biological Sciences* 285, 20172242.
- Humann-Guillemot S., Binkowski Ł.J., Jenni L., Hilke G., Glauser G., Helfenstein F., 2019. A nationwide survey of neonicotinoid insecticides in agricultural land with implications for agri-environment schemes (J Rohr, Éd). *Journal of Applied Ecology* 56, 1502-1514.
- Inglada J., Vincent A., Arias M., Tardy B., Morin D., Rodes I., 2017. Operational High Resolution Land Cover Map Production at the Country Scale Using Satellite Image Time Series. *Remote Sensing* 9, 95.
- Klages S., Heidecke C., Osterburg B., Bailey J., Calciu I., Casey C., Dalgaard T., Frick H., Glavan M., D'Haene K., et al., 2020. Nitrogen surplus-a unified indicator for water pollution in Europe? *Water (Switzerland)* 12, 1197.
- Mulla D.J., 2013. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture, Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering* 114, 358-371.
- De Notaris C., Rasmussen J., Sørensen P., Olesen J.E., 2018. Nitrogen leaching, a crop rotation perspective on the effect of N surplus, field management and use of catch crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 255, 1-11.
- Oenema O., Kros H., de Vries W., 2003. Approaches and uncertainties in nutrient budgets, implications for nutrient management and environmental policies. *European Journal of Agronomy* 20, 3-16.
- Padilla F.M., Gallardo M., Manzano-Agugliaro F., 2018. Global trends in nitrate leaching research in the 1960–2017 period. *Science of the Total Environment* 643, 400-413.
- Palomo-Campesino S., González J., García-Llorente M., Palomo-Campesino S., González J.A., García-Llorente M., 2018. Exploring the Connections between Agroecological Practices and Ecosystem Services, A. Systematic Literature Review. *Sustainability* 10, 4339.
- Panagos P., Borrelli P., Meusburger K., Alewell C., Lugato E, Montanarella L., 2015a. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy* 48, 38-50.
- Panagos P., Borrelli P., Poesen J., Ballabio C., Lugato E., Meusburger K., Montanarella L., Alewell C., 2015b. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy* 54, 438-447.
- Parnaudeau V., Reau R., Dubrulle P., 2012. Un outil d'évaluation des fuites d'azote vers l'environnement à l'échelle du système de culture, le logiciel Syst'N. *Innovations Agronomiques* 21, 59-70.
- Pique G., Fieuzal R., Al Bitar A., Veloso A., Tallec T., Brut A., Ferlicoq M., Zawilski B., Dejoux J.-F, Gibrin H., Ceschia E., 2020a. Estimation of daily CO₂ fluxes and of the components of the carbon budget for winter wheat by the assimilation of Sentinel 2-like remote sensing data into a crop model. *Geoderma*, 376, 114428.
- Pique G., Fieuzal R., Debaeke P., Al Bitar A., Tallec T, Ceschia E., 2020b. Combining high-resolution remote sensing products with a crop model to estimate carbon and water budget components: Application to sunflower. *Remote Sensing*, 12, 2967,
- Sieling K., Günther-Borstel O., Teebken T., Hanus H., 1999. Soil mineral and net mineralization during autumn and winter under an oilseed rape-winter wheat-winter barley rotation in different crop management systems. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 132, 127-137.
- Sirami C., Gross N., Baillod A.B., Bertrand C., Carrié R., Hass A., Henckel L., Miguet P., Vuillot C., Alignier A., et al., 2019. Increasing crop heterogeneity enhances multitrophic diversity across agricultural regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 201906419.
- Tibi A., Therond O., 2017. Evaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFSE. Synthèse du rapport d'étude
- Tribouillois H., Constantin J., Guillon B., Willaume M., Aubrion G., Fontaine A., Hauprich P, Kerveillant P., Laurent F., Therond O., 2020. AqYield-N, a simple model to predict nitrogen leaching from crop fields. *Agricultural and Forest Meteorology* 284, 107890.

Uthes S., Heyer I., Kaiser A., Zander P., Bockstaller C., Desjeux Y., Keszthelyi S., Kis-Csatári E., Molnar A., Wrzaszcz W., et al., 2019. Costs, quantity and toxicity, Comparison of pesticide indicators collected from FADN farms in four EU-countries. *Ecological Indicators* 104, 695-703.

Vaudour E., Gomez C., Fouad Y., Lagacherie P., 2019. Sentinel-2 image capacities to predict common topsoil properties of temperate and Mediterranean agroecosystems. *Remote Sensing of Environment* 223, 21-33.

Veloso A., Mermoz S., Bouvet A., Le Toan T., Planells M., Dejoux J.F., Ceschia E., 2017. Understanding the temporal behavior of crops using Sentinel-1 and Sentinel-2-like data for agricultural applications. *Remote Sensing of Environment* 199, 415-426.

Vertès F., Benoît M., Dorioz J.M., 2010. Couverts herbacés pérennes et enjeux environnementaux (en particulier eutrophisation) : atouts et limites. *Fourrages* 202, 83-94.

Zhao J., De Notaris C., Olesen J.E., 2020. Autumn-based vegetation indices for estimating nitrate leaching during autumn and winter in arable cropping systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 290, 106786.

Cet article est publié sous la licence Creative Commons (CC BY-NC-ND 3.0).



<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>

Pour la citation et la reproduction de cet article, mentionner obligatoirement le titre de l'article, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue « *Innovations Agronomiques* », la date de sa publication, et son URL ou DOI).