



HAL
open science

Données spatiales, qualité des sols et services écosystémiques: questionnement et perspectives

Isabelle Trinsoutrot-Gattin, Romain Armand, Pierre-Yves Bernard, Elodie Cusset, Nadia Laurent, Marc Legras, Wassila Riah-Anglet, Karine Laval

► To cite this version:

Isabelle Trinsoutrot-Gattin, Romain Armand, Pierre-Yves Bernard, Elodie Cusset, Nadia Laurent, et al.. Données spatiales, qualité des sols et services écosystémiques: questionnement et perspectives. 2021, pp.29-42. 10.15454/j3d3-pb66 . hal-03542999

HAL Id: hal-03542999

<https://hal.inrae.fr/hal-03542999>

Submitted on 25 Jan 2022

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

Données spatiales, qualité des sols et services écosystémiques: questionnement et perspectives

**Trinsoutrot-Gattin I.¹, Armand R.², Bernard P.-Y.¹, Cusset E.¹, Laurent N.¹, Legras M.¹,
Riah-Anglet W.¹, Laval K.¹**

¹ UniLaSalle, Unité AGHYLE UP 2018.C101 campus Rouen, 3 Rue du Tronquet, F-76134 Mont-Saint-Aignan Cedex. SFR Normandie végétal FED 4277

² UniLaSalle, Unité AGHYLE UP 2018.C101 campus Beauvais, 19 rue Pierre Waguet, F-60026 Beauvais Cedex. SFR Condorcet FR CNRS 3417

Correspondance : isabelle.gattin@unilasalle.fr

Résumé

La qualité du sol est au cœur des enjeux de la transition agroécologique. Pourtant, s'il existe une grande richesse d'information pour la caractériser, la difficulté à pouvoir compiler les données acquises à des échelles diverses et selon des méthodes non normalisées rend délicate la construction de référentiels. Cette difficulté est encore accrue lorsque l'on ambitionne de prendre en compte le compartiment biologique du sol, acteur majeur des transformations biochimiques, régulateur de la disponibilité des éléments nutritifs et en conséquence élément déterminant de la fertilité des sols. Compte tenu des contraintes liées à l'étude de la biologie ou microbiologie des sols, les données spatiales pourraient-elles permettre d'améliorer notre compréhension de l'état et du fonctionnement biologique des sols ?

Mots-clés : Sol, Indicateurs, Etat biologique, Référentiel, Nouvelles technologies

Abstract: Spatial data, soil quality and ecosystem services: questions and perspectives

Soil quality is essential to answer the agro-ecological transition requirement. However, although a large amount of information is available to characterise it, the difficulty of combining data acquired at various scales and using non-standardised methods makes it difficult to build reference systems. This difficulty is even more important when the aim is to take into account soil biology, a major player in biochemical transformations, a regulator of nutrient availability and consequently a determining factor in soil fertility. Given the constraints linked to the study of soil biology or microbiology, could spatial data sets help to improve our understanding of the state and biological functioning of soil?

Keywords: Soil, Indicators, Biological state, References, New technologies

Introduction

L'agriculture est une activité économique en évolution permanente. D'abord soumise aux évolutions techniques et technologiques, c'est aujourd'hui en faisant face aux contraintes environnementales et aux attentes sociétales que cette évolution s'opère. En effet, la transition agroécologique actuelle, implique un changement des pratiques agricoles contribuant à la préservation de la biodiversité et des ressources non renouvelables (Francis et Wezel, 2015). Cette transition ne correspond pas à la recherche d'une solution unique, mais au développement d'une somme de solutions imparfaites qui seraient capables de prendre en compte la diversité des contextes et confèreraient alors à l'agriculture un rôle capital dans la préservation des ressources non renouvelables (Chevassus-au-Louis, 2013). S'il existe des pratiques

agricoles inadéquates susceptibles d'affecter tous les compartiments de l'environnement (Zhang *et al.*, 2007 ; Perfecto et Vandermeer, 2010 ; Tilman *et al.*, 2011 ; Hayes *et al.*, 2011; Tschantke *et al.*, 2012), une grande diversité de pratiques a vu le jour sous des noms aussi divers que : agriculture durable, écologiquement intensive, agro-écologique, multifonctionnelle, de conservation, régénérative (...) qui viennent rejoindre des mouvements plus anciens tels que l'agriculture biologique (Kremen et Miles, 2012 ; Schreefel *et al.*, 2020). Ces systèmes intègrent par exemple une plus grande diversité de plantes cultivées et de variétés utilisées, la mise en place de cultures intermédiaires et/ou de couverts permanents, un travail du sol plus superficiel, la préservation d'espaces non cultivés favorables à la biodiversité, l'agroforesterie... Ces formes d'agriculture se retrouvent autour d'une volonté d'un moindre recours aux intrants de synthèse pour gérer la nutrition et la santé des plantes. Il s'agit là de l'un des objectifs du Green Deal européen : produire une nourriture saine, nutritive et de haute qualité à l'échelle de l'Union Européenne. Pour répondre à cet objectif, et dans la mesure où une nourriture saine ne peut venir que d'un sol sain (Farm to Fork strategy), il est nécessaire de mettre en œuvre des mesures de préservation de la qualité des sols et de limitation de leur contamination (Montanarella et Panogos, 2021). Ces enjeux s'entendent de l'échelle de la parcelle à celle des territoires et impliquent le recours à des observatoires, réseaux de surveillance, à des pas de temps et d'espace variés, pour lesquels les données spatiales ouvrent de nouvelles perspectives. Ces nouvelles technologies susceptibles d'offrir une large variété de données, géolocalisées et acquises régulièrement, permettent de suivre l'état des sols et de développer des outils d'aide à la décision opérationnels pour une gestion optimisée des sols au service de la transition agro-écologique. L'objectif de cette communication est de questionner le potentiel de ces outils pour une meilleure compréhension de l'état et du fonctionnement biologique des sols au regard des contraintes liées à l'observation du vivant.

1. Etat des sols, observatoire et surveillance

Aujourd'hui 56% des sols européens sont dégradés ce qui représente un coût annuel pour l'Union Européenne de 38 milliards d'euros (Union Européenne, 2011). Tous les sept ans en France, une surface de terre équivalente à celle d'un département français est imperméabilisée de manière difficilement réversible (Club Parlementaire pour la Protection et l'Etude des Sols (CPPES), 2014) ; Chaque année, en moyenne 82 000 hectares de terres agricoles sont perdus, ce qui correspond à plus de 220 hectares par jour soit l'équivalent de la surface de 4 exploitations de taille moyenne (Jean et Morel, 2011). Cette situation est d'autant plus préoccupante que les changements d'occupation du sol comptent parmi les principaux effets de l'homme sur l'environnement (Berthelin *et al.*, 2011) notamment l'imperméabilisation des sols qui est une raison majeure de leur dégradation (Kovalick et Montgomery, 2014 ; Padiaditi *et al.*, 2010). Cette situation provoque de plus en plus de conflits d'usage vis-à-vis de cette ressource non renouvelable à l'échelle humaine (Wall et Six, 2015). Ces constats alarmants sont le fruit de l'absence d'une prise en compte suffisante du sol dans la construction des politiques environnementales. Tandis que l'air et l'eau bénéficient de réglementations et de systèmes de surveillance de leurs qualités au niveau national et européen, le sol apparaît comme le parent pauvre des politiques publiques environnementales en Europe. Si une gestion économe et équilibrée des espaces est préconisée dans le code de l'urbanisme, dans le droit européen et ré-affirmée en droit international, les instruments existants sont très peu contraignants (Courtoux et Claveirole, 2015). En effet, les états ne se sont pas emparés des engagements inscrits dans les chartes européenne et mondiale des sols (1972, 1981). Dans le droit français, les rares dispositions qui pourraient permettre de préserver les sols sont éparses, ce qui leur ôte aujourd'hui toute réelle lisibilité (Robert, 2012). Les réglementations environnementales concernant les sols n'ont été envisagées dans un premier temps que dans une optique de gestion du risque pour les sites contaminés (Rodriguez *et al.*, 2009), la contamination des sols ayant été identifiée comme la menace principale des sols en Europe (CEC, 2002). Mais les pressions qui s'exercent sur les sols ont des origines diverses et concernent la plupart des activités anthropiques : le développement industriel, l'urbanisation, les productions agricoles, le développement des transports et des espaces récréatifs... La contamination

des sols n'est pas la seule conséquence de ces activités. En effet, les problèmes d'imperméabilisation, de compaction, d'érosion, de salinisation, de perte de biodiversité et de perte de matière organique sont également soulignés (CEC, 2006). Dans la résolution adoptée lors de l'assemblée générale des Nations Unies le 25 septembre 2015, la protection des sols a été intégrée comme l'un des éléments du programme de développement durable à l'horizon 2030. Cette nouvelle posture de prise en compte des problématiques environnementales a engendré (1) la mise en place d'outils de surveillance à l'échelle européenne (Stone *et al.*, 2016) et (2) a conduit à repenser l'agriculture au regard des nouveaux enjeux (Lal, 2016).

La proposition de solutions scientifiques et techniques est indispensable pour alimenter les dispositifs réglementaires nécessaires à l'atteinte de ces objectifs ambitieux. La difficulté de l'exercice réside dans la pluralité temporelle des mécanismes mis en jeu. Il est fondamental que la recherche puisse évaluer l'état des sols et quantifier les impacts des activités humaines au regard de ses différentes fonctions. Elle doit produire des outils simples et robustes pour la mise en place de systèmes de surveillance de l'état des sols en prenant garde à leur pertinence vis-à-vis de leur capacité à exprimer une valeur écosystémique.

2. Evaluation de la qualité et des fonctions des sols

Ces 20 dernières années, de nombreux pays européens ont mis en place des réseaux de surveillance nationaux de l'état des sols afin d'étudier leur variabilité spatiale et temporelle (FAO/ECE, 1994). En France notamment, de nombreuses cartographies ont été réalisées dans le cadre du programme Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (IGCS) coordonné par le Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Sols (GIS Sol) ; les Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP) en sont une illustration. Cependant, d'un pays à l'autre, les cadres d'application de ces observations diffèrent en matière de répartition spatiale et d'indicateurs pris en compte complexifiant un traitement commun des données à l'échelle européenne (Morvan *et al.*, 2008) ce qui a suscité, la construction du réseau européen de surveillance LUCAS sur l'utilisation et la couverture des sols en 2009. L'ensemble de ces données de surveillance, principalement utilisées en modélisation pour l'élaboration d'outils d'aide à la décision et à des fins de recherche ont principalement concerné les caractéristiques physicochimiques des sols. A titre d'illustration, le menu analytique du réseau LUCAS (Land Use and Coverage Area frame Survey) en 2009 était le suivant : éléments grossiers, granulométrie, pH eau et CaCl₂, teneur en carbonate, carbone organique, P, N, K, capacité d'échange cationique et propriétés multispectrales. La description de la biodiversité n'est pas prise en compte. Ce n'est en effet que très récemment que des indicateurs biologiques d'état des sols ont fait leur apparition dans certains systèmes de surveillance : « Biological Indicators of Soil Quality » (BISQ, Pays Bas ; Rutgers *et al.*, 2009), Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS, France, Cluzeau *et al.*, 2009), « countryside survey » (Angleterre, Black *et al.*, 2003) et « Boden-Dauerbeobachtungsflächen (BDF, Allemagne, Römbke *et al.*, 2013). Ce constat n'a rien de surprenant dans la mesure où l'acquisition d'indicateurs de biodiversité nécessite d'éprouver les variables descriptives du compartiment biologique et d'acquérir des référentiels. A titre d'exemple, au moment même où les premiers réseaux se sont mis en place, l'émergence de la biologie moléculaire permettait tout juste d'accéder à la biodiversité microbienne des sols. Plus récemment, des projets nationaux (Pérès *et al.*, 2011 ; Cluzeau *et al.*, 2012) et européens (Creamer *et al.*, 2016 ; Rutgers *et al.*, 2016 ; Stone *et al.*, 2016) ont eu pour objectif de contribuer à l'identification d'indicateurs biologiques performants susceptibles d'intégrer des réseaux de surveillance. Ainsi, en 2018, le réseau LUCAS a intégré dans son menu analytique des descripteurs de la biodiversité du sol sur 1000 points en Europe (sur les 20000 sélectionnés en 2009 pour les paramètres physicochimiques) les paramètres suivants : bactéries et archae (16S rDNA), champignons (ITS), Eukaryotes (18S rDNA), microfaune (nématodes), mésofaune (arthropodes), Macrofaune (ver de terre), métagénomique.

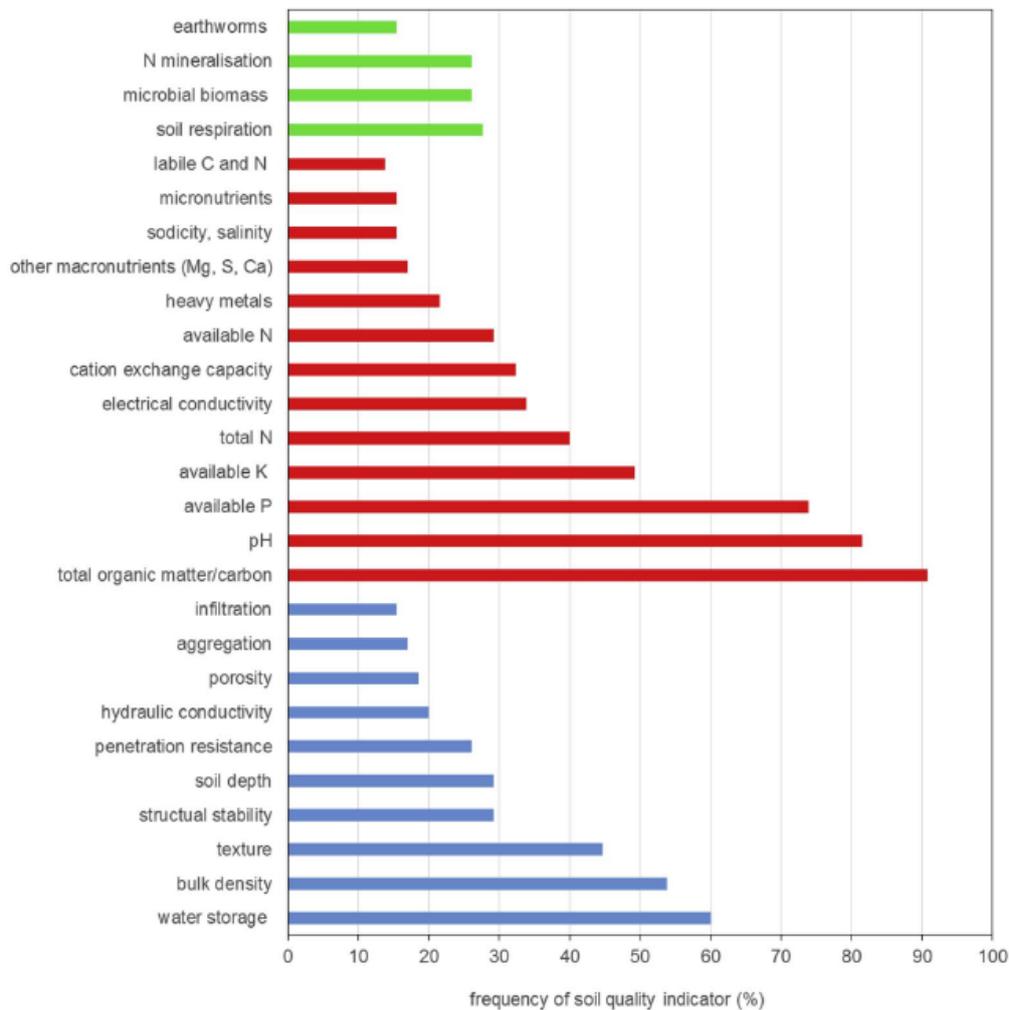


Figure 1 : Fréquence des différents indicateurs utilisés dans les approches d'évaluation de la qualité des sols (n=65). Les indicateurs biologiques, chimiques et physiques sont représentés respectivement en vert, rouge et bleu. (Bünemann *et al.*, 2018)

La Figure 1, extraite de la revue de la littérature proposée par Bünemann *et al.* (2018), présente les indicateurs les plus communément rencontrés pour évaluer l'état des sols (exclusion faite des articles dédiés spécifiquement aux sols forestiers ou aux indicateurs biologiques). Ce travail confirme la très faible prise en compte des indicateurs biologiques et la prédominance de la quantification du carbone organique, du pH et de la disponibilité d'éléments nutritifs, notamment le phosphore. Cela est cohérent avec les menus actuellement disponibles dans les laboratoires d'analyse de sol et les caractéristiques majeures utilisées pour l'aide à la conduite culturale dans un objectif de performance agronomique pour des systèmes de culture conventionnels dans lesquels l'utilisation d'intrants chimiques est une composante essentielle (Comifer, 2013). Pourtant, ces indicateurs ne sont plus adaptés quand il s'agit d'évaluer des systèmes de culture en transition agroécologique, dans lesquels le raisonnement n'est plus basé uniquement sur la gestion des intrants. En effet, la durabilité de ces systèmes de culture repose sur leur capacité à entretenir la biodiversité (Wardle *et al.*, 2004 ; Brussaard *et al.*, 2007), élément constitutif essentiel de la résilience du sol (Riah-Anglet *et al.*, 2015 ; 2018). Ainsi, l'observation de l'évolution du fonctionnement des sols ne peut se restreindre aux simples analyses physico-chimiques qui s'inscrivent généralement sur des pas de temps pluriannuels (Puglisi *et al.*, 2006). Les contraintes liées aux analyses biologiques ont incité à rechercher des indicateurs plus faciles à mesurer, susceptibles de rendre compte de la variabilité des communautés microbiennes et de leurs activités. Par exemple, les corrélations entre

pH et abondance bactérienne (Fierer et Jackson, 2006 ; Lauber *et al.*, 2009 ; Rousk *et al.*, 2010 ; Guigue *et al.*, 2015 ; Creamer *et al.*, 2016) ou entre teneur en matière organique et activités enzymatiques (Hendriksen *et al.*, 2015), simples à mettre en œuvre, semblent séduisantes. Pourtant, si leur utilisation est adaptée à l'observation à une échelle « macro », leur mesure peut recouvrir des réalités très différentes en termes de fonctionnement des sols à l'échelle de la parcelle. En conséquence, les indicateurs de biodiversité et d'activités biologiques demeurent essentiels à la compréhension des observations. Les nombreuses études menées dans des contextes pédoclimatiques diversifiés et en utilisant des variables descriptives variées (Tscherko et Kandeler, 1999 ; Marinari *et al.*, 2006 ; Benintende *et al.*, 2008 ; Kaschuk *et al.*, 2011 ; Paz- Ferreiro *et al.*, 2013), rendent difficile l'émergence de consensus clairs et la définition d'une méthodologie générique pour l'évaluation des systèmes de culture agro-écologiques.

Pour répondre à ces enjeux, dès la fin des années 1990, différents programmes de recherche nationaux ont vu le jour en France : le programme de recherche GESSOL "Fonctions environnementales et GESTion du patrimoine SOL" (ministère en charge de l'écologie), Bioindicateur (Ademe), Casdar AGRINNOV, ..., ou encore plus récemment, le projet Casdar Microbiotterre (2019). Ces programmes s'inscrivent dans l'ambition d'identifier puis de référencer des indicateurs d'état biologique des sols pour améliorer la gestion des agrosystèmes. A titre d'exemple, la Figure 2 illustre les résultats du projet Microbiotterre, et montre que l'apport de produits résiduels organiques (6 sites, 13 modalités) entraîne des changements significatifs pour un grand nombre d'indicateurs et que plus l'essai est de longue durée, plus le changement est important. En revanche, la mise en place de couverts intermédiaires (5 sites, 10 modalités) n'entraîne que très peu de changements dans les valeurs des indicateurs mesurés. Ces résultats confirment des travaux précédents sur l'importance du choix de l'indicateur en fonction de la pratique évaluée (Bispo *et al.*, 2013).

PRO		Âge essai +			CIPAN		Âge essai +		
		6 ans	20 ans	33 ans			8 ans	27 ans	47 ans
Variables		EFELE	FEU	CRECOM	AUZEVILLE	BOI ENV	BOI A1		
		Fumier vs. Témoin	Fumier vs. Témoin	Fumier vs. Témoin					
Variables physico-chimiques	C org (%)		***	**					
	C org Rock-Eval (g/kg)	*	***	**					
	C stable 100 ans (g/kg)								
	C 0-50 (%)		***	*					
	C 50-200 (%)	***	***	***					
	C 200-2000 (%)	*							
	C 50-2000 (%)		***	*					
	Carbone actif (g/kg)	*	***	*					
	C oxydé (mg/kg)	*	***	***					
	C labile 20 ans (g/kg)		***	*					
	N total (%)		***	**					
	N 0-50 (%)		***	*					
	N 50-200 (%)	*	***	**					
	N 200-2000 (%)	*	**						
	N 50-2000 (%)		***	*					
Variables biologiques	ADN total (µg/g)			*					
	Biomasse microbienne (mg/kg)		*	**					
	16S (copies/g)	**							
	18S (copies/g)	**		*					
	Ergostérol total (mg/kg)								
	Ergostérol libre (mg/kg)								
	Ergostérol lié (mg/kg)				*				
	18S/16S								
	FDA (nmol/min/g)		*						
	Activité protéase (nmol/min/g)	*		**					
	LAP (nmol/min/g)	*	***	**					
	Arylamidase (nmol/min/g)	***	**	***					
	N minéralisé (mg/kg 28 j)			*					
	APM (mg/kg)			*					
	ABM (mg/kg)		**						
Glucosidase (nmol/min/g)									
C minéralisé (mg/kg 28j)			**						

■ Indicateurs discriminants : * 5%, ** 1% et *** 0,1% ■ Indicateurs non mesurés

Figure 2 : Réponse des indicateurs à l'apport de produits résiduels organiques (PRO) ou la mise en place de culture intermédiaire pièges à nitrates (CIPAN) (Projet Casdar Microbiotterre, Deschamps *et al.*, 2019).

3. Estimation des fonctions des sols

Au-delà de son état, le sol, interface active, en interaction avec l'air et l'eau, dont il permet une régulation en terme quantitatif et qualitatif (Girard *et al.*, 2011), est décrit comme un capital naturel capable de produire durablement des biens et services utiles aux hommes tels que la qualité de l'eau, de l'air, la protection de la biodiversité, le stockage du carbone (Dominati *et al.*, 2010 ; Palm *et al.*, 2007 ; Robinson *et al.*, 2009). Il en résulte que plus d'un tiers des objectifs de développement durable proclamés par les Nations Unies en 2015 reposent sur la capacité qu'auront les sociétés à préserver cette ressource (Figure 3). Aussi, ce sont bien les multiples fonctions que les sols assument qui doivent être estimées (Gobat *et al.*, 2010), les connaissances concernant leurs fonctions et les services écosystémiques qu'ils délivrent sont encore très lacunaires (Swinton *et al.*, 2006 ; Adhikari et Hartemink, 2016).



Figure 3 : Sols et objectifs de développement durable des Nations unies (Agence Européenne de l'Environnement, 2019 - infographie Sols & Objectifs de développement)

La capacité des sols à fournir ces services n'est pas égale. Elle est sous la dépendance de divers facteurs dont les conditions pédoclimatiques, topographiques et anthropiques (mode d'occupation des sols, pratiques culturelles,...). Il est nécessaire d'optimiser les fonctions des sols en lien avec leur potentiel intrinsèque et ce en cohérence avec les enjeux aux différentes échelles locale, nationale, continentale et intercontinentale (Schulte *et al.*, 2014). Dans ce contexte, l'agriculture et tout particulièrement la transition agroécologique peut jouer un rôle déterminant pour optimiser et préserver ces services d'autant plus importants que la production alimentaire devrait être augmentée de 60% à l'horizon 2050 pour faire face à la demande mondiale croissante (Alexandros et Bruijsma, 2012).

La qualification de ces services et leur évaluation monétaire est un questionnement qui fait face à des verrous scientifiques et sociétaux, d'une part par manque de disponibilité de données acquises aux différentes échelles et d'autre part, du fait de l'acceptabilité des citoyens à considérer la valeur des terres au-delà de l'offre et de la demande. C'est dans ce cadre que le programme H2020 Landmark a eu pour objectif de quantifier les fonctions fournies par le sol à l'échelle de l'Union Européenne, au regard des propriétés, des modes d'occupation et des pratiques de gestion des sols agricoles. Il s'est appuyé sur une méthodologie multi-acteurs, impliquant agriculteurs, organisations professionnelles agricoles, collectivités territoriales, agences de l'environnement. Ce projet s'est inscrit à différentes échelles et notamment celle de la parcelle pour proposer un outil d'aide à la décision, « Soil Navigator », pour les agriculteurs (Figure 4). L'enjeu est de pouvoir tirer le meilleur parti du sol de manière durable en suivant 3 étapes : (1) évaluer à l'échelle de la parcelle le niveau de fourniture de 5 fonctions des sols agricoles (production primaire, cycle des éléments nutritifs, séquestration du carbone, régulation de l'eau, biodiversité), (2) proposer une diversité de recommandations de gestion des sols pour améliorer les fonctions des sols estimées prioritaires au regard du potentiel intrinsèque du sol, des enjeux du territoire et des objectifs individuel de l'agriculteur et (3) évaluer les modifications des fonctions des sols après les choix de gestion de l'agriculteur.

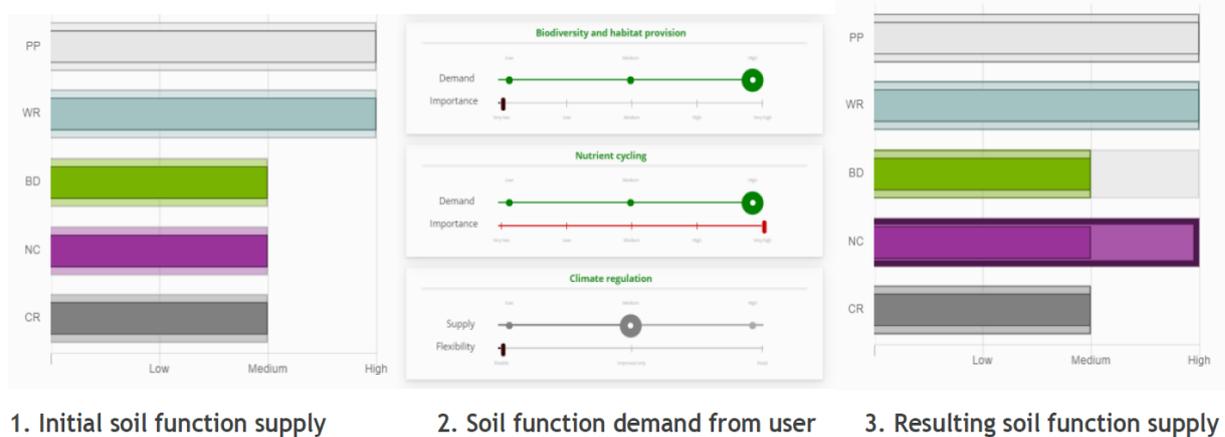


Figure 4 : Soil Navigator – 3 étapes de l'évaluation des fonctions des sols agricoles Comment tirer le meilleur parti de mon sol de manière durable. Avec PP = production primaire ; WR= régulation de l'eau ; BD = biodiversité NC = cycle des éléments nutritifs ; CR = séquestration du carbone

L'évaluation à travers cet outil repose sur un processus décrit sur la Figure 5. Les données d'entrée nécessaires à l'évaluation incluent des variables descriptives des propriétés biologiques, physiques et chimiques des sols, la description des pratiques agricoles sur la parcelle, des données géographiques permettant de situer la parcelle dans son contexte pédoclimatique notamment. Cet exemple de programme a mis en exergue une fois encore, la complexité de l'exercice dans la mesure où les données d'entrée ont été choisies à dire d'experts et acquises à l'échelle européenne par des acteurs locaux. Malgré une coordination conséquente, l'outil demeure difficile à généraliser à l'échelle de l'Europe et insuffisamment discriminant dans un objectif de pilotage des agrosystèmes. La valorisation de données spatiales pour la construction et l'amélioration de tels outils est un levier majeur face aux limites actuelles.

Le Soil Navigator pourrait être mobilisé pour enrichir l'outil de gestion durable des éléments nutritifs (FaST - **Farm Sustainability Tool for Nutrients**) proposé dans le cadre des bonnes pratiques agricoles et environnementales (BPAE), **dans le cadre de la PAC 2021**. L'outil FaST, vise à faciliter la gestion durable de la fertilisation pour tous les agriculteurs de l'UE par la proposition **d'un plan de gestion des éléments nutritifs** et des recommandations personnalisées sur la fertilisation des cultures. **Les résultats attendus sont** la réduction des fuites de nutriments dans les eaux souterraines et les rivières, ainsi qu'une

contribution positive à la qualité des sols et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cet outil a également un objectif de digitalisation des informations pour faciliter la numérisation de la gestion de la PAC qui ambitionne la mise en place d'un nouveau système intégré de gestion et de contrôle (NIVA) faisant appel à des données Sentinel. Pour autant, les données disponibles permettront-elles réellement un pilotage des pratiques agricoles pour la fourniture de services écosystémiques ?

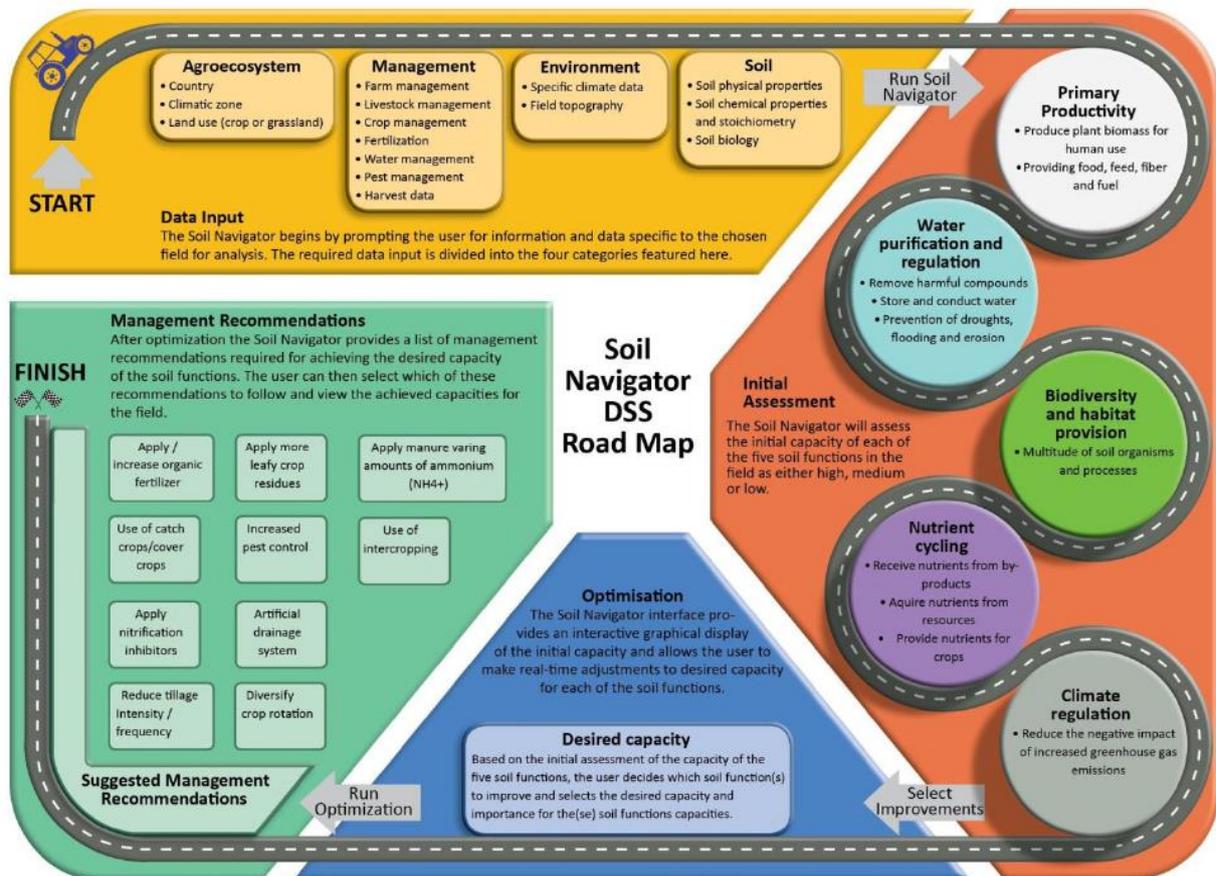


Figure 5 : Feuille de route de l'outil d'aide à la décision « Soil Navigator » : Fonctionnement de l'OAD et étapes nécessaires pour effectuer l'évaluation (Bugge Henriksen *et al.*, 2019)

4. Apports de la télédétection dans la prédiction et le suivi de la qualité des sols

Si l'utilisation des données spatiales pose encore de nombreuses questions quant à leurs possibilités et sur le choix des variables à observer dans les sols, de nombreuses avancées ont été rendues possibles par l'observation des couverts au travers de l'interprétation visuelle d'images satellitaires comme CORINE Land Cover (CLC). De même en agriculture, l'outil d'aide à la décision Farmstar, issu d'une collaboration entre les instituts techniques Arvalis – Institut du Végétal et Terres Inovia d'une part et Airbus Defence and Space d'autre part, offre l'accès à des informations sur l'état des cultures (peuplement, état de nutrition, risque de maladies,...) qui peuvent être mobilisées pour accompagner le raisonnement de la fertilisation azotée par exemple.

La multiplication des supports disponibles pour l'acquisition des données (satellites, avion, drone, tracteurs, robots) génère un nombre de données extraordinaire et fait basculer l'agriculture dans l'ère du Big Data. Les données peuvent être de très haute résolution et acquises à des échelles spatiales variées, dans tous les spectres électromagnétiques (visible, infrarouge). Dans ces conditions, la quantité de données disponible va exploser, d'autant que les données peuvent être acquises à des pas de temps réguliers permettant non plus une photo à un temps T mais bien un suivi dynamique. Dès lors, comment

mobiliser cette multitude de données, comment leur donner du sens pour nous aider à affiner le suivi de l'état des sols ?

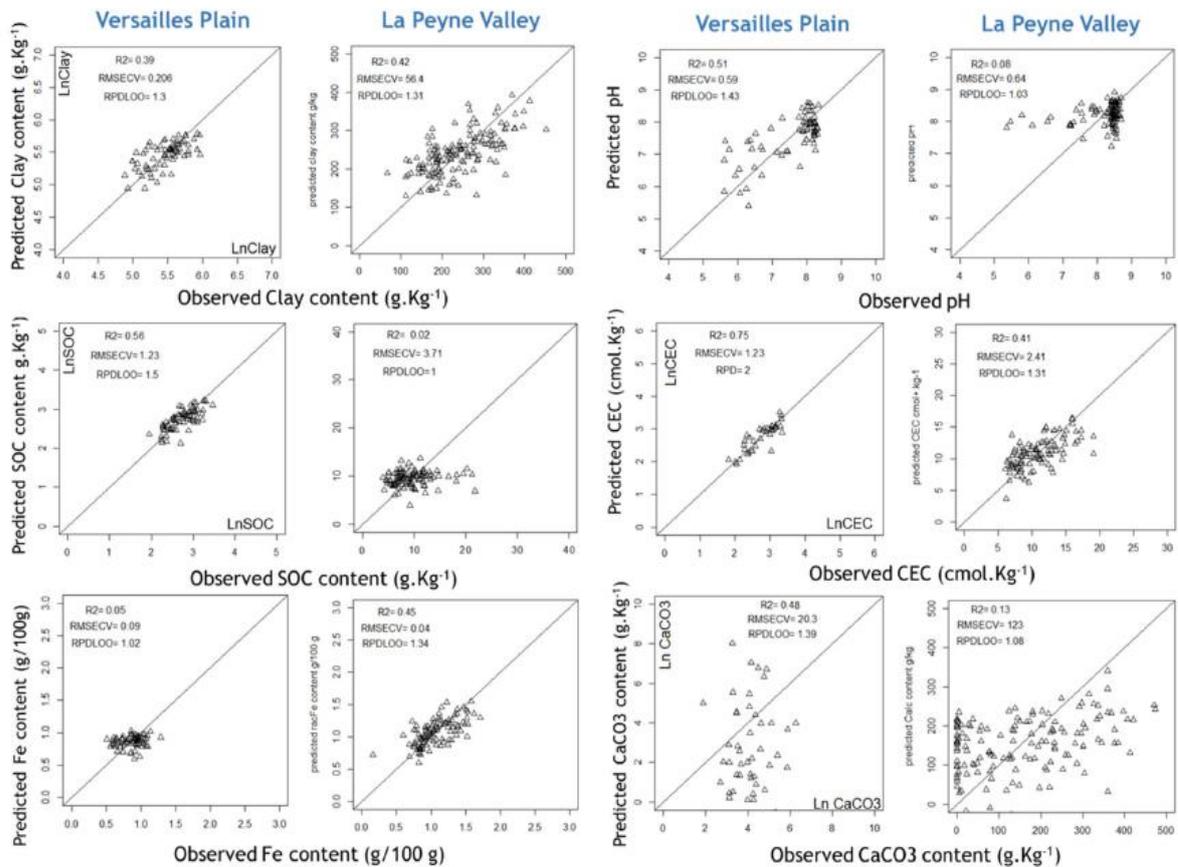


Figure 6 : Propriétés des sols prédites vs. observées dans 2 contextes pédoclimatiques (plaine de Versailles (Yvelines) à gauche et Vallée de la Peyne (Hérault) à droite pour 6 propriétés des sols (Vaudour *et al.*, 2019).

Les analyses spectrales, notamment l'analyse infra-rouge sont utilisées depuis longtemps pour étudier l'état des sols (Comino *et al.*, 2018 ; Summers *et al.*, 2011). La Figure 6 présente le potentiel de données spectrales obtenues par satellite sentinel-2. Elle montre que la prédiction de certains paramètres peut être de bonne qualité (i.e. carbone organique du sol, pH, CEC et CaCO₃ pour les sols de la plaine de Versailles) mais que ces prédictions peuvent être faites avec un succès variable en fonction des propriétés spectrales intrinsèques et des conditions de surface du sol ; elles peuvent également présenter notamment des variances intra-régionales (pH, carbone organique du sol, teneur en fer).

Ces résultats sont confortés par d'autres études qui vont même plus loin en proposant des indices d'état des sols basés exclusivement sur des descripteurs physicochimiques (Paz-Kagan *et al.*, 2015 ; de Paul Obade et Lal, 2016). S'il semble envisageable de pouvoir prédire les paramètres physicochimiques du sol à partir d'analyses spectrales, peu de travaux concernant les paramètres biologiques sont référencés, du fait de la complexité de la mise en œuvre des analyses biologiques (stratégie spatiotemporelle d'échantillonnage, variable descriptive observée, ...) et des coûts associés. Le développement de méthodologies permettant l'acquisition de références en plus grand nombre et l'utilisation d'approches statistiques incluant la spatialisation des données appliquée aux données biologiques est un enjeu essentiel. Il devrait faciliter la constitution de référentiels indispensables à l'évaluation de la gestion des sols et de leur impact sur l'ensemble des services écosystémiques rendus.

Conclusion

L'agriculture est confrontée à un changement de paradigme qui impose une prise en compte accrue de ses externalités environnementales afin de maximiser les effets positifs. Cela repose sur une meilleure prise en compte du sol qui devient non plus un support de culture, mais un véritable « partenaire » pour maintenir une production abondante et de qualité tout en limitant les intrants. La construction des différents indicateurs d'état du sol ou de fourniture de services écosystémiques nécessitent un panel d'indicateurs acquis à des granulométries différentes (sol, pratiques pluriannuelles, couverture du sol à l'instant T ; ...). L'utilisation de données spectrales séduit par la possibilité qu'elle représente de rendre compte de la variabilité spatiale et temporelle de l'état du sol, pour son potentiel dans la constitution rapide de référentiels, indispensables pour donner du sens aux variables mesurées. En conséquence, elle semble être une voie d'intérêt pour répondre aux enjeux agroécologiques et environnementaux définis dans le cadre du green deal et un atout pour l'élaboration d'outils facilement accessibles et utilisables.

Néanmoins, nous manquons aujourd'hui de références précises, opérationnelles et validées scientifiquement pour ces nouveaux outils. Dans ces conditions, il n'est pas possible aujourd'hui d'évaluer leur capacité à permettre une meilleure compréhension du fonctionnement des sols, pour la construction de conseils techniques fiables et cohérents sur les plans agronomique, économique et environnemental. En particulier, ces outils sont-ils capables de rendre compte des processus écologiques permettant de limiter le recours aux intrants et maintenir un taux de matières organiques important ? Sont-ils à même de pouvoir évaluer précocement les effets des changements de pratiques vis-à-vis d'objectifs de performance immédiate (fertilité) en cohérence avec les attentes à terme (stockage C par exemple) et ce, dans une diversité de conditions agropédologiques ?

L'utilisation de ces outils est sans conteste un moyen fiable et rapide qui peut servir les aspects réglementaires liés à la PAC. Les applications pour une meilleure gestion des pratiques agricoles, peuvent être relativement simples, telles que l'aide à la fertilisation, mais également s'étendre jusqu'au développement d'outil complexes intégratifs permettant à l'agriculture de maintenir et faire-valoir les services écosystémiques rendus par les sols agricoles. Les avancées dans l'acquisition et l'accessibilité de données spatiales permettent non seulement l'accompagnement des transitions des pratiques agricoles, mais au-delà, ces nouvelles technologies invitent l'agriculture à se repenser en exploitant ces nouveaux potentiels et laissent présager d'une révolution du conseil agricole.

Références bibliographiques

- Adhikari K., Hartemink A.E., 2016. Linking soils to ecosystem services - A global review. *Geoderma*. 262, 101–111.
- Alexandros N., Bruinsma J., 2012. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. ESA Working paper No. 12-03. Rome, FAO
- Benintende S., Benintende M., Sterren M., De Battista J., 2008. Soil microbial indicators of soil quality in four rice rotation systems. *Ecol. Indic.* 8, 704–708.
- Berthelin J., Girard M.C., Robert M., 2011. – La ressource en sols : menaces, nouveaux enjeux et mesures de protection. Chap. 36, p. 833-857 in *Sols et Environnement*, Eds Dunod
- Bispo A., Peres G., Hedde M., Gattin I., Cluzeau D., et al., 2013. Les enseignements du programme ADEME “ Bioindicateurs de l'état biologique des sols ”. Séminaire national du “ Programme Inventaire, Gestion et Conservation des Sols (IGCS) ”, Dec 2013, Rennes, France. hal-01606698.
- Black H.I.J., Parekh N.R., Chaplow J.S., Monson F., Watkins J., Creamer R., Potter E.D., Poskitt J.M., Rowland P., Ainsworth G., Hornung M., 2003. Assessing soil biodiversity across Great Britain: national trends in the occurrence of heterotrophic bacteria and invertebrates in soil. *Journal of Environmental Management* 67, 255-266.

- Brussaard L., Pulleman M.M., Ouedraogo E., Mandod A., Six J., 2007. Soil fauna and soil function in the fabric of the food web. *Pedobiologia* 50, 447-462.
- Bugge Henriksen C., et al., 2019. <http://landmark2020.eu/pillars/soil-navigator-pillar1/>
- Bünemann E.K., Bongiorno G., Bai Z., Creamer R.E., De Deyn G., de Goede R., Fleskens L., Geissen V., Kuyper T.W., Mäder P., Pulleman M., Sukkel W., van Groenigen J.W., Brussaard L., 2018. Soil quality – A critical review. *Soil Biology and Biochemistry* 120, 105–125.
- Commission of the European Communities (CEC), 2002. Communication from the European Commission, Action Plan “Simplifying and improving the regulatory environment” COM (2002) 278 final.
- Chevassus-au-Louis B., 2013. *La biodiversité c'est maintenant*. Les éditions de l'Aube. 192p. ISBN 978-2-8159-0694-4.
- Cluzeau D., Guernion M., Chaussod R., Martin-Laurent F., Villenave C., Cortet J., Ruiz-Camacho C., Pernin T., Mateille, Philippot L., Bellido A., Rougé L., Arrouays D., Bispo A., Pérès G., 2012. Integration of biodiversity in soil quality monitoring: Baselines for microbial and soil fauna parameters for different land-use types. *European Journal of Soil Biology* 49, 63-72.
- Cluzeau D., Pérès G., Guernion M., Chaussod R., Cortet J., Fargette M., Martin-Laurent F., Mateille T., Pernin C., Ponge J.F., Ruiz-Camacho, N., Villenave C., Rougé L., Mercier V., Bellido A., Cannavacciuolo M., Arrouays D., Boulonne L., Jolivet C., Lavelle P., Velasquez E., Plantard O., Walter C., Foucaud-Lemercier B., Tico S., Giteau J.L., Bispo A., 2009. Intégration de la biodiversité des sols dans les réseaux de surveillance de la qualité des sols: exemple du programme-pilote à l'échelle régionale, le RMQS BioDiv. *Etude et Gestion des Sols*, 16, 3/4, 187–201.
- Comifer, 2013. *Calcul de la fertilisation azotée - Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales*. 159 p.
- Comino F., Aranda V., Garcia-Ruiz R., Ayora-Canada M.J., Dominguez-Vidal A., 2018. Infrared spectroscopy as a tool for the assessment of soil biological quality in agricultural soils under contrasting management practices. *Ecol. Indic.* 87, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.12.046>.
- Commission of the European Communities (CEC), 2006. Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council, establishing a framework for the protection of soil and amending Directive 2004/35/EC. Com 231 final, Brussels.
- Courtoux A., Claveirole C., 2015. *La bonne gestion des sols agricoles : un enjeu de société*. 2015-14. NOR
- CPPEs, Le Club Parlementaire pour la Protection et l'Etude des Sols (Philippe B.), 2014. *La journée mondiale des sols, le colloque de l'Association Française pour l'Etude du Sol*.
- Creamer R.E., Hannula S.E., Van Leeuwen J.P., Stone D., Rutgers M., Schmelz R.M., de Ruyter P.C., Bohse Hendriksen N., Bolger T., Bouffaud M.L., Buee M., Carvalho F., Costa D., Dirilgen T., Francisco R., Griffiths B.S., Griffiths R., Martin F., Martins da Silva P., Mendes S., Morais P.V., Pereiral C., Philippot L., Plassart P., Redecker D., Römbke J., Sousa J.P., Wouterse M., Lemanceau P., 2016. Ecological network analysis reveals the inter-connection between soil biodiversity and ecosystem function as affected by land use across Europe. *Applied Soil Ecology*.
- de Paul Obade V., Lal R., 2016. A standardized soil quality index for diverse field conditions. *Science of the Total Environment* 541, 424–434.
- Deschamps T., Bouthier A., Cusset E., Houot S., Laurent N., Leclerc B., Perrin A.-S., Recous S., Riah-Anglet W., Roussel P.-Y., Trinsoutrot-Gattin I., Valé M., 2019. Evaluation sur des essais au champ d'indicateurs de microbiologie des sols – Premiers résultats du projet MICROBIOTERRE. 14èmes RENCONTRES de la fertilisation raisonnée et de l'analyse. 20 & 21 novembre 2019, Dijon.
- Dominati E., Patterson M., Mackay A., 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecology Economy*. 69 (9), 1858 -1868FAO/ECE, 1994
- FAO/ECE., 1994 International Workshop on Harmonisation of Soil Conservation Monitoring Systems. FAO–FAO/ECE-RISSAC, 14–17 September 1994, Budapest, Hungary; 1994. 224 pp.
- Fierer N., Jackson R.B., 2006. The diversity and biogeography of soil bacterial communities. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 103, 626-631.

- Francis C.A., Wezel A., 2015. Agroecology and Agricultural Change. International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences, 2nd edition, Volume 1. doi.org/10.1016/B978-0-08-097086-8.91026-2
- Girard M.C., Schwartz C., Jabiol B., 2011. Étude des sols. Description, cartographie, utilisation. Ed. Dunod, Paris.
- Gobat J.M., Aragno M., Matthey W., 2010. Le Sol vivant. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 817 p.
- Guigue J., Leveque J., Mathieu O., Mounier S., Schmitt-Kopplin P., Lucio M., Arrouays D., Jolivet C., Dequiedt S., Chemidlin Prévost-Bouré N., Ranjard L., 2015. Water-extractable organic matter linked to soil physico-chemistry and microbiology at the regional scale. *Soil Biology & Biochemistry* 84, 158-167
- Hayes T.B., Anderson L.L., Beasley V.R., de Solla S.R., Iguchi T., Ingraham H., Willingham E., 2011. Demasculinization and feminization of male gonads by Atrazine: consistent effects across vertebrate classes. *The Journal of Steroid Biochemistry and Molecular Biology* 27 (1), 64–73.
- Hendriksen N.B., Creamer R.E., Stone D., Winding A., 2015. Soil exo-enzyme activities across Europe: The influence of climate, land-use and soil properties *Applied Soil Ecology* 97, 44-48.
- Holland J.M., 2004. The environmental consequences of adopting conservation tillage in Europe-reviewing the evidence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 103, 1–25.
- Jean R., Morel M.P., 2011. Les paysages agricoles dominent toujours le territoire français. *Agreste Primeur*. 260, 4p.
- Kaschuk G., Alberton O., Hungria M., 2011. Quantifying effects of different agricultural land uses on soil microbial biomass and activity in Brazilian biomes: inferences to improve soil quality. *Plant Soil*. 338, 467–481.
- Kovalick J.R., Montgomery R.H., 2014. Developing a Program for Contaminated Site Management in Low and Middle Income Countries. International Bank for Reconstruction and Development/The World Bank, Washington
- Kremen C., Miles A., 2012. Ecosystem services in biologically diversified versus conventional farming systems: benefits, externalities, and trade-offs. *Ecology and Society* 17 (4), 40.
- Lal R., 2016. Climate Change and Agriculture, Chapter 28. In *Climate Change (Second Edition)*, Letcher T., (Ed.) p 465–489.
- Lauber C.L., Hamady M., Knight R., Fierer N., 2009. Pyrosequencing-based assessment of soil pH as a predictor of soil bacterial community structure at the continental scale. *Applied and Environmental Microbiology* 75, 5111-5120
- Marinari S., Mancinelli R., Campiglia E., Grego S., 2006. Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy. *Ecol. Indic.* 6, 701–711.
- Montanarella L., Panagos P., 2021. The relevance of sustainable soil management within the European Green Deal. *Land Use Policy* 100, 104950. doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104950
- Palm C., Sanchez P., Ahamed S., Awiti A., 2007. Soils: a contemporary perspective. *Annual Review of Environmental Resource*. 32, 99 -129.
- Paz-Ferreiro J., Fu S., 2013. Biological indices for soil quality evaluation: perspectives and limitations, *Land Degrad. Dev.*, doi10.1002/ldr.2262, online first, 2014.
- Paz-Kagan T., Zaady E., Salbach C., Schmidt A., Lausch A., Zacharias S., Notesco G., Ben-Dor E., Karnieli A., 2015. Mapping the Spectral Soil Quality Index (SSQI) Using Airborne Imaging Spectroscopy. *Remote Sens.* 2015, 7, 15748-15781
- Pediaditi K., Doick K.J., Moffat A.J., 2010. Monitoring and evaluation practice for brown field, regeneration to greenspace initiatives: a meta-evaluation of assessment and monitoring tools. *Landscape and urban planning* 97 (1), 22-36.
- Pères G., Vandenbulcke F., Guernion M., Hedde M., Beguiristain T., Douay F., Houot S., Piron D., Richard A., Bispo A., Grand C., Galsomies L., Cluzeau D., 2011. Earthworm indicators as tools for soil monitoring, characterization and risk assessment. An example from the national Bioindicator programme (France). *Pedobiologia* 54S, S77–S87.

- Perfecto I., Vandermeer J., 2010. The agroecological matrix as alternative to the land-sparing/agriculture intensification model. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107, 5786–5791.
- Puglisi E., Del Re A.A.M., Rao M.A., Gianfreda L., 2006. Development and validation of numerical indexes integrating enzyme activities of soils. *Soil Biology & Biochemistry* 38, 1673–1681.
- Riah-Anglet W., Trinsoutrot-Gattin I., Martin-Laurent F., Laroche-Ajzenberg E., Norini M.-P., Latour X., Laval K., 2015. Soil microbial community structure and function relationships: A heat stress experiment. *Applied Soil Ecology* 86, 121-130.
- Riah-Anglet W., Trinsoutrot-Gattin I., Norini M.-P., Gauthier A., Latour X., Laval K., 2018. Initial state of soil microbial communities determines their stress response. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 6(4), 5470-5480.
- Robert S., 2012. Soil quality assessment for spatial planning in urban and peri-urban areas. The Provence coal field case study. Rapport final, 28 novembre Robinson *et al.*, 2009
- Robinson D.A., Lebron I., Vereecken H., 2009. On the definition of the natural capital of soils: a framework for description, evaluation, and monitoring. *Soil Science Society of American Journal*, 73 (6), 1904–1911.
- Rodriguez L., Ruiz E., Alonso-Azcarate J., Rincon J., 2009. Heavy metal distribution and chemical speciation in tailings and soils around a Pb–Zn mine in Spain. *Journal of Environmental Management*. 90(2): 1106-1111.
- Römbke J., Jänsch S., Höfer H., Horak F., Roß-Nickoll M., Russell D., Toschki A., 2013. State of knowledge of enchytraeid communities in German soils as a basis for biological soil quality assessment. *Soil Organisms*. 85 (2), 123–146. Rousk *et al.*, 2010
- Rousk J., Bååth E., Brookes P.C., Lauber C.L., Lozupone C., Caporaso J.G., Knight R., Fierer N., 2010. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil. *ISME Journal* 4, 1340e1351.
- Rutgers M., Orgiazzi A., Gardi C., Römbke J., Jänsch S., Keith A.M., Neilson R., Boag B., Schmidt O., Murchie A.K., Blackshaw R.P., Pérès G., Cluzeau D., Guernion M., Briones M.J.I., Rodeiro J., Piñeiro R., Díaz Cosín D.J., Paulo Sousa J., Suhadolc M., Kos I., Krogh P.H., Faber T.H., Mulder C., Bogte J.J., van Wijnen H.J., Schouten A.J., de Zwart D., 2016. Mapping earthworm communities in Europe. *Applied Soil Ecology* 97, 98-111.
- Rutgers M., Schouten A.J., Bloem J., Van Eekeren N., De Goede R.G.M., Jagers op Akkerhuis G.A.J.M., Van der Wal A., Mulder C., Brussaard L., Breure A.M., 2009. Biological measurements in a nationwide soil monitoring network. *European Journal of Soil Science* 60, 820–832.
- Schreefel L., Schulte R.P.O., de Boer I.J.M., Pas Schrijver A., van Zanten H.H.E., 2020. Regenerative agriculture – the soil is the base. *Global Food Security* 26, 100404. doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100404
- Schulte R.P.O., Creamer R., Donnellan T., Farrelly N., Fealy R., O'Donoghue C., O'hUallachain D., 2014. Functional land management: a framework for managing soil-based ecosystem services for the sustainable intensification of agriculture. *Environmental science policy* 38, 45–58.
- Stone D., Ritz K., Griffiths B.G., Orgiazzi A., Creamer R.E., 2016. Selection of biological indicators appropriate for European soil monitoring. *Applied soil ecology* 97, 12-22
- Summers D., Lewis M., Ostendorf B., Chittleborough D., 2011. Visible near-infrared reflectance spectroscopy as a predictive indicator of soil properties. *Ecol. Indic.* 11, 123–131.
- Swinton S.M., Lupi F., Robertson G.P., Landis D.A., 2006. Ecosystem services from agriculture: looking beyond the usual suspects. *American Journal of Agricultural Economics* 88 (5), 1160–1166.
- Tilman D., Balzer C., Hill J., Befort B.L., 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108 (50), 20260–20264.
- Tscharntke T., Clough Y., Wanger T.C., Jackson L., Motzke I., Perfecto I., Whitbread A., 2012. Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. *Biological Conservation* 151(1), 53–59.
- Tscherko D., Kandeler E., 1999. Classification and monitoring of soil microbial biomass, N-mineralization and enzyme activities to indicate environmental changes. *Bodenkultur* 50, 215-226.

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.

Wall D.H., Six J., 2015. Give soils their due. *Science*, 347:695.

Wardle D.A., Bardgett R.D., Klironomos J.N., Setälä H., Van der Putten W.H., Wall D.H., 2004. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science* 304:1629–1633.

Zhang W., Ricketts T.H., Kremen C., Carney K., Swinton S.M., 2007. Ecosystem services and dis-services to agriculture. *Ecology Economy* 64(2), 253–260.

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).