

Agro-Eco Sol, un outil de diagnostic des fonctions du sol basé sur des bioindicateurs ; structure et règles générales d'interprétation

Christine LE SOUDER (1), Matthieu VALE (2), Florent CHLEBOWSKI (1,2), Lionel RANJARD (3), Pierre-Alain MARON (3), Samuel DEQUIEDT (3), Mickaël HEDDE (4), Jérôme CORTET (5), Nathalie CHEVIRON (6), Christian MOUGIN (6), Nicolas SABY (7), Cécile VILLENAVE (8), Caroline DIZIEN (9), Baptiste SOENEN (10)

(1) ARVALIS – Institut du Végétal, 91720 Boigneville

(2) AUREA Agrosociétés, 270 avenue de la pomme de pin, 45160 Ardon

(3) INRAE, UMR Agroécologie, 17 rue de Sully, 21065 Dijon Cedex

(4) INRAE, UMR Eco&Sols, 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex

(5) CEFE, Université Paul-Valéry Montpellier 3, Route de Mende, 34199 Montpellier cedex 5

(6) INRAE, UMR ECOSYS – Plateforme Biochem-Env, Route de Saint-Cyr, 78026 Versailles

(7) INRAE, US InfoSol, 2163 avenue de la pomme de pin, 45160 Ardon

(8) ELISOL Environnement, ZA des Tourels, 10 avenue du midi, 30111 Congénies

(9) Agrosolutions, 17 rond-point de l'Europe, 51430 Bezannes

(10) ARVALIS – Institut du Végétal, 241 Route de Chapulay, 69330 Pusignan

INTRODUCTION

Evoluer vers une agriculture plus éco-efficace et durable ne sera possible que si les acteurs qui la mettront en œuvre (agriculteurs, conseillers techniques, ingénieurs et chercheurs) disposent d'outils leur permettant d'apprécier les aptitudes culturales des sols, d'appréhender l'impact de leurs pratiques pour orienter les modes de gestion agricoles, et cela « en routine », c'est à dire rapidement et pour un coût raisonnable. Or, si l'on dispose aujourd'hui, à travers diverses méthodes (analyse de terre, diagnostic de l'état structural de surfaces...), d'outils pertinents pour évaluer les états physiques et chimiques des sols et ainsi prévoir leur évolution sous l'effet des pratiques culturales, nous sommes très loin de disposer d'un tel niveau d'opérationnalité pour apprécier l'état et le fonctionnement biologique des sols cultivés (abondance, diversité et activité des organismes du sol). Inclure la composante biologique dans les outils de diagnostic et conseil est essentiel pour évaluer et piloter la diversité des services que l'on attend des sols (support de la production, stockage du carbone, limitation des émissions de GES, régulation des bioagresseurs...).

Le projet Agro-Eco Sol (AES) vise le développement d'une offre de conseil agroécologique incluant des bioindicateurs de la qualité des sols. Il s'agit d'industrialiser des processus inédits d'analyse de terre, pour délivrer un conseil de gestion globale des sols agricoles aux agriculteurs. Les services rendus évalués seront aussi bien agronomiques qu'environnementaux, et d'abord dans le domaine de la grande culture.

Les innovations du projet portent sur :

- L'industrialisation des bioindicateurs : optimisation de l'ensemble du processus analytique afin d'augmenter la capacité de traitement, abaisser le prix de revient et réduire les délais d'analyse (protocoles de prélèvement harmonisés, modes opératoires optimisés et industrialisés grâce à l'utilisation d'automates) ;
- La construction du conseil opérationnel à partir de ces bioindicateurs : constitution de référentiels d'interprétation (effet du pédoclimat et des pratiques culturales), définition de niveaux souhaitables des fonctions / services renseignés par ces bioindicateurs, ainsi que des leviers d'action possibles pour atteindre ces niveaux, construction d'algorithmes de conseil et réalisation de supports de formation /

communication ;

- L'accessibilité du service : dématérialisation de la collecte d'information et de la consultation des résultats et automatisation du conseil.

Cet article se focalise principalement la seconde innovation, à savoir l'élaboration du conseil, en introduisant au préalable les bioindicateurs utilisés :

- 1- Les bioindicateurs dans le périmètre du projet et les tâches de transfert et/ou d'optimisation au laboratoire ;
- 2- l'élaboration du schéma d'interprétation, basé sur un diagnostic de satisfaction de certaines fonctions du sol ; après une présentation du schéma général, des données d'entrée, et de la restitution d'un positionnement relatif pour les bioindicateurs, seront abordés : la typologie construite débouchant sur un niveau souhaitable, l'arborescence entre indicateurs et fonctions permettant d'aboutir à un niveau d'atteinte, l'apport d'une méthode (DAG) pour enrichir les liens entre bioindicateurs et processus, et enfin le diagnostic et le conseil.

1. INDUSTRIALISATION DES INDICATEURS INNOVANTS

1.1. CRITERES DE CHOIX DES INDICATEURS

En complément des analyses physico-chimiques et d'observations terrain, six grands types d'indicateurs de la matière organique ou d'indicateurs biologiques sont mis en œuvre (Tableau 1). Ils vont permettre une meilleure caractérisation de la MO labile, des microorganismes du sol (bactéries, champignons, activités enzymatiques) et de la faune du sol (collembolles, carabidés, vers de terre et nématodes).

Tableau 1 – Indicateurs biologiques mobilisés dans Agro-Eco Sol

Indicateur	Méthode	Nature des travaux dans le projet Agro-Eco Sol
Caractérisation de la matière organique : carbone et azote labiles/stables	Fractionnement granulométrique de la matière organique	Optimisation par Auréa AgroSciences
	<ul style="list-style-type: none"> • Carbone labile KMnO₄ • Azote Biologiquement Minéralisable (ABM) 	Transfert de technologie par SEMSE
Abondance microbienne	Carbone microbien par fumigation-extraction	Optimisation par Auréa AgroSciences et SEMSE
	<ul style="list-style-type: none"> • ADN microbien total • Abondance relative des champignons (ADNr 18S) et des bactéries (ADNr 16S) (ratio F/B) 	Transfert de technologie par INRAE UMR Agroécologie et acquisition de références par INRAE UMR Agroécologie et Auréa AgroSciences (ratio F/B)
Activité microbienne	Activités enzymatiques <ul style="list-style-type: none"> • Cycle du Carbone : β-Glucosidase, β-Galactosidase • Cycle de l'Azote : Uréase, Arylamidase • Cycle du Phosphore : Phosphatase, PDE (phospho-diesterase) • Cycle du Soufre : Arylsulfatase 	Optimisation et acquisition de références par INRAE UMR ECOSYS-Plateforme Biochem-Env
Diversité des bactéries et champignons	Diversité taxonomique par séquençage ADN haut débit	Acquisition de références par INRAE UMR Agroécologie (champignons)
Abondance et diversité des vers de terre, des carabidés et des collembolles	Identification par analyse morphologique	Transfert de technologie par INRAE UMR Eco&Sols et Université Montpellier CEFE
	Diversité moléculaire de la faune du sol	Étude de faisabilité par INRAE UMR Eco&Sols et Université Montpellier CEFE
Abondance et diversité	Identification par analyse morphologique	Prestataire analyse de la nématofaune :

des nématodes		ELISOL Environnement
---------------	--	----------------------

La sélection des indicateurs s'est basée sur différents critères, le premier étant un mode opératoire éprouvé et référencé :

- Soit par une norme (fractionnement granulométrique de la MO selon la NF X31-516 ; carbone microbien selon la NF ISO 14240-2; ADN microbien selon la NF ISO 11063 (2011), modifiée par Terrat et al, 2015; activités enzymatiques selon la NF EN ISO 20130, Abondance et diversité des nématodes selon la NF EN ISO 23611-4) ;
- Soit par des publications scientifiques (Weil *et al.*, 2003 pour le carbone oxydable au KMnO_4 ; Keeney, 1982 pour l'ABM ; Paoletti, 1999, Moretti *et al.*, 2016 et Pey *et al.*, 2014 pour les vers de terre, carabidés et collemboles).

De plus, les indicateurs doivent être mesurables en routine, c'est-à-dire avec des coûts, délais et capacités de production compatibles avec une commercialisation à grande échelle. Enfin les indicateurs doivent disposer d'un référentiel d'interprétation, qui se compose (i) d'une distribution des valeurs à l'échelle du territoire français et des facteurs explicatifs liés au pédoclimat, (ii) des liens avec les fonctions du sol et (iii) de l'impact des pratiques agricoles sur les indicateurs et donc sur les fonctions.

Les indicateurs listés dans le tableau 1 ne présentaient pas tous le même degré de maturité vis-à-vis de ces critères au début du projet. Les travaux menés ont pour objectif de combler ces lacunes.

1.2. OPTIMISATION DE LA PRODUCTIVITE DES INDICATEURS

Dans le processus analytique, un des principaux points de blocage réside dans la préparation des échantillons.

La mise au point d'un automate de préparation a ainsi permis de remplacer le tamisage manuel à 5 mm par un tamisage automatisé à 2 mm (Figure 1), sans modifier les résultats d'analyses. De plus, la meilleure homogénéité de l'échantillon ainsi préparé devrait permettre de s'affranchir de répétition de mesure.



Figure 1 - Terre brute tamisée à 2 mm par l'automate

Un autre verrou est le délai entre le prélèvement et l'analyse, souvent réduit pour les paramètres biologiques, ce qui peut poser problème en cas de gros volumes à analyser. Des travaux menés sur les activités enzymatiques ont abouti à un compromis améliorant la flexibilité du délai entre les prélèvements et les mesures d'activité fonctionnelle : séchage à l'air des échantillons tamisés à 2 mm, puis mesure après réhumectation pendant 48 h. L'utilisation d'un facteur correctif défini sur une

grande diversité de sols permet d'obtenir des résultats comparables à l'analyse sur sol frais.

La limitation de productivité réside parfois dans le principe de la mesure elle-même. Cela a pu être résolu par de l'optimisation de matériel (dispositif de tamisage miniaturisé pour le fractionnement granulométrique de la matière organique) ou du mode opératoire (remplacement des 16 heures de fumigation par 1 heure de lyse directe pour le carbone microbien).

1.3. ACQUISITION DE DONNEES POUR COMPLETER LES REFERENTIELS

Si la biomasse microbienne moléculaire et la richesse bactérienne bénéficiaient déjà des référentiels acquis sur le Réseau de Mesure de la Qualité des Sols (RMQS, Dequiedt *et al.*, 2020), et la nématofaune du référentiel ELIPTO, développé par ELISOL environnement (à partir de plus de 3 000 analyses) et de connaissances de l'effet des pratiques (Puissant *et al.*, 2021), ce n'était pas le cas des autres indicateurs. Des travaux complémentaires ont été conduits pour amener la majorité des indicateurs du projet au même niveau de référencement.

2. ELABORATION DU MOTEUR D'INTERPRETATION

2.1. CONCEPTION DU SCHEMA D'INTERPRETATION

2.1.1. Etat des références

A notre connaissance, il n'existe pas actuellement, en France, de moteurs opérationnels d'interprétation et de conseil pour les bioindicateurs qui soient basés sur un diagnostic de satisfaction de fonctions du sol. Seul le projet européen Landmark (Horizon 2020 - Schulte *et al.*, 2017), est construit sur la base d'une arborescence fonctionnelle et de production de conseils qui est proche de celle visée dans notre outil, avec un périmètre cependant différent.

Ce qui existe pour la plupart des bioindicateurs, ce sont des référentiels nationaux, ou régionaux, contextualisant chacune des mesures réalisées. C'est le cas par exemple pour la biomasse microbienne moléculaire des sols et sa diversité (Dequiedt *et al.*, 2020), pour les indicateurs d'abondance, de diversité et de raréfaction des collemboles (Joimel *et al.*, 2017), et pour ceux liés aux vers de terre et autres bioindicateurs des sols *via* le « Réseau de Mesures de la Qualité des Sols – Biodiversité » en Bretagne (Cluzeau *et al.*, 2012). Certains scientifiques spécialistes de ces bioindicateurs, dans le cadre d'Agro-Eco Sol, disposent toutefois de référentiels plus larges et complémentaires que ceux présentés dans ces publications. Il est ainsi possible de positionner de nouvelles mesures au sein de ces distributions, mais sans appréhension fine des processus et fonctions impactées qui pourraient orienter de façon logique le déclenchement de leviers.

2.1.2. Principe général du moteur d'interprétation

A partir des données d'entrée dont dispose le laboratoire, issues soit de renseignements soit de mesures, leur interprétation va s'orienter vers 2 voies :

- Le positionnement relatif d'une mesure au sein d'une distribution, pour tous les indicateurs biologiques
- Le moteur d'interprétation fonctionnelle, dans lequel réside une forte valeur ajoutée, conduisant au conseil vers l'agriculteur (Figure 2).

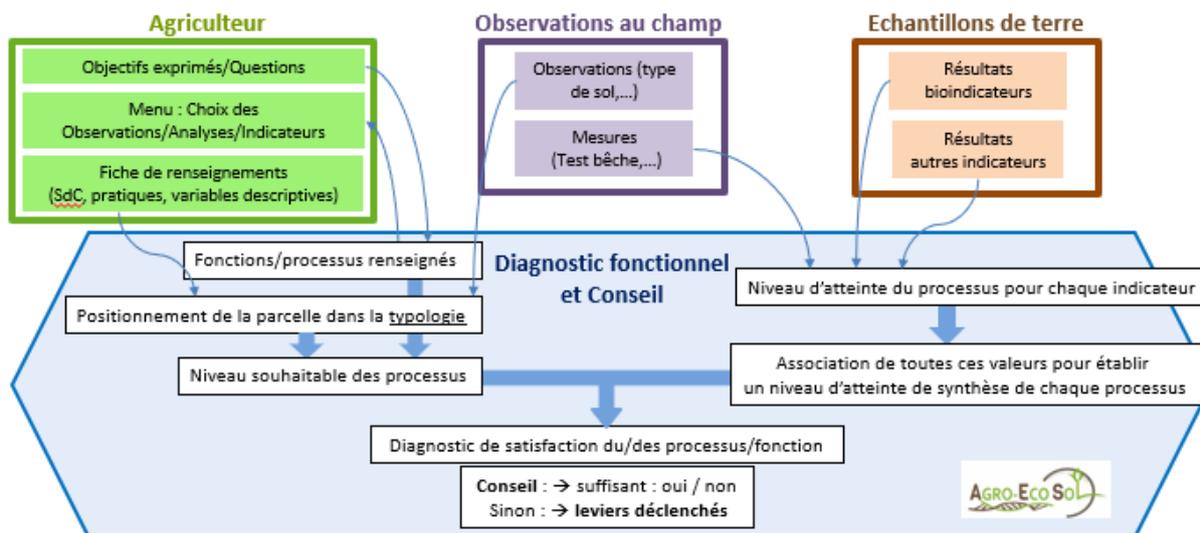


Figure 2 – Structure générale du schéma d'interprétation fonctionnelle d'Agro-Eco Sol

Le principe général qui guide l'élaboration du moteur d'interprétation fonctionnelle réside dans la réalisation d'un diagnostic de satisfaction des fonctions du sol. Pour cela on se restreint bien sûr aux fonctions présentes dans le périmètre d'Agro-Eco Sol c'est-à-dire potentiellement renseignées par les indicateurs mis en œuvre dans le projet.

Pour réaliser ce diagnostic, il est nécessaire de disposer d'une part d'un niveau souhaitable, adapté à la situation de la parcelle agricole ciblée, et d'autre part d'un niveau d'atteinte ou observé, évalué par un indicateur ou plutôt une combinaison d'indicateurs mesurés. Les 2 niveaux sont ensuite confrontés, établissant alors un diagnostic pour chacune des fonctions (non satisfaite, satisfaite, satisfaite au-delà des attendus) conduisant alors à un conseil (niveau satisfaisant avec rien à déclencher, ou niveau non satisfaisant conduisant le déclenchement de levier).

2.2. LES DONNEES D'ENTREE

Les données utilisées en entrée du moteur d'interprétation sont principalement de 3 ordres : les données parcellaires de l'agriculteur sur la parcelle échantillonnée, les mesures et observations réalisées lors du prélèvement, et les indicateurs mesurés au laboratoire.

Les données parcellaires concernent les cultures implantées, principales et en interculture, le mode de travail du sol et les apports réalisés, renseignées par l'agriculteur. Ces informations sont quasiment identiques à celles demandées pour la réalisation d'un plan de fumure, avec néanmoins un niveau de précision plus élevé, sur une série glissante de 5 années (l'année n en cours, et les années n-2, n-1, n+1 et n+2).

Les mesures et observations réalisées au champ, lors des prélèvements des différents échantillons de terre nécessaires, permettent d'accéder à de précieux indicateurs, comme la définition du type de sol et son rattachement à un sol de la base SOLS d'Arvalis, et l'évaluation de la structure au moment du prélèvement (test bêche).

Les indicateurs biologiques mesurés au laboratoire ont été largement décrits précédemment. Des indicateurs plus classiques les accompagnent : physiques (granulométrie...) physico-chimiques (CEC...) et chimiques (pHeau, teneurs en P₂O₅ Olsen...).

2.3. LE POSITIONNEMENT RELATIF

Il est basé sur une interprétation qualitative des valeurs des indicateurs biologiques de la parcelle par rapport à une distribution géographique (nationale, régionale, par distributeur...) et/ou croisée par usage (grandes cultures, prairies, vignes...). En plus d'une restitution graphique (courbes de densité...), des commentaires seront proposés à l'agriculteur (valeurs élevées, moyennes ou faibles au sein du référentiel cité), mais sans déboucher sur des conseils car non reliés à des fonctions à ce stade.

Ainsi, l'ensemble des bioindicateurs sera valorisé dans cette restitution. Ce positionnement relatif peut être réalisé dès la mise en marché pour tous les bioindicateurs, au départ au sein de référentiels transmis par les scientifiques spécialistes de leur indicateur, et à terme, au sein du référentiel capitalisé par Auréa.

Ce positionnement relatif sera accompagné de modèles de prise en compte du pédoclimat pour les indicateurs de microbiologie moléculaire et de biochimie environnementale, ainsi que de potentiels fonctionnels pour les vers de terre.

2.4. LE MOTEUR FONCTIONNEL

2.4.1. La typologie

Si les caractéristiques des pédoclimats et des systèmes de culture sont souvent prises en compte dans les outils d'aide à la décision existants en agriculture, il n'existe pas à notre connaissance de typologie complète et générique de ces pédoclimats et systèmes de culture, encore moins en lien avec les processus agronomiques des sols. C'est vis-à-vis de ces processus en lien avec l'activité biologique des sols, que les bioindicateurs seront à même de qualifier, que nous cherchons à caractériser les différents systèmes de culture.

Une classification générique des systèmes a donc été réalisée, dans l'objectif d'englober tous les cas possibles. Pour cela, plusieurs clés d'entrée (12 critères au total) ont été déterminées pour décrire le système (Figure 3), en termes de pédoclimat, stratégie et conduite culturale.

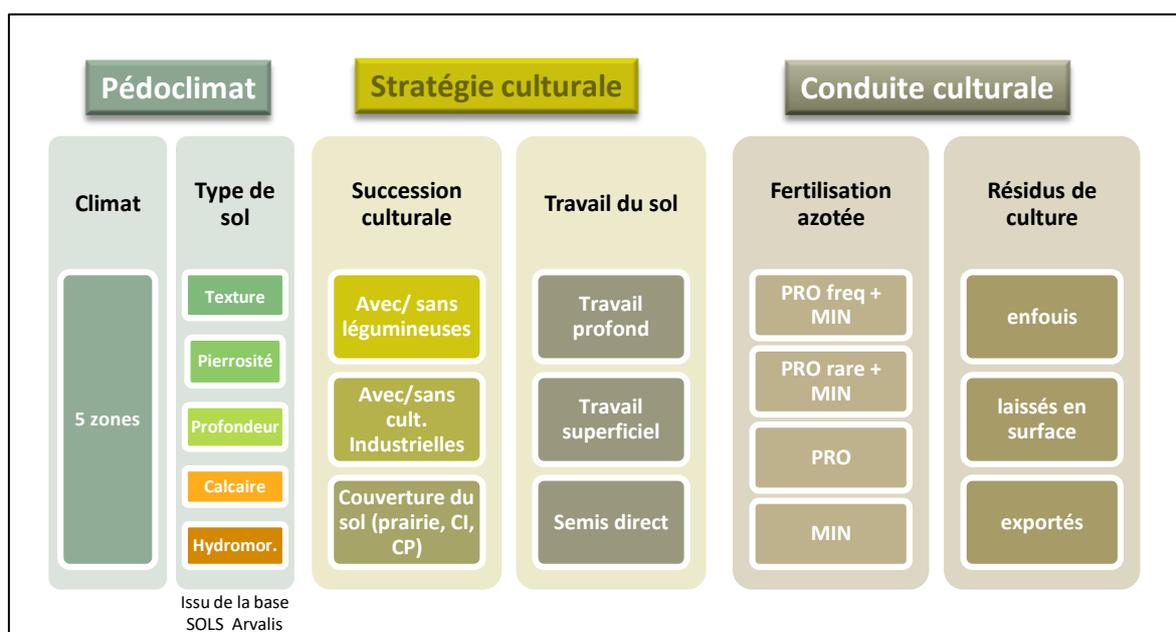


Figure 3 – Typologie des situations parcelaires : critères de description des parcelles cultivées utilisés dans Agro-Eco Sol

Chaque critère descriptif du système de culture ainsi défini est ensuite évalué vis-à-vis de chacune des fonctions ou chacun des processus retenus dans le projet. Cette évaluation consiste en la définition de deux notes allant de 1 à 3 : niveau souhaitable et niveau d'exigence.

Le niveau souhaitable est le niveau objectif de valeur de la fonction ou du processus pour le système de culture considéré (1 = niveau faible, 3 = niveau élevé). Il a donné lieu à la définition préalable d'un niveau attendu de valeur de la fonction et du processus (à partir des notes de chaque modalité de critères par processus et fonction, puis pondérées, donnant une note établie entre 1,00 à 3,00) ; une règle de décision différente selon le type de processus lui est appliquée pour définir le niveau souhaitable (soit on vise le maximum à 3.00 utilisé pour les processus environnementaux comme par exemple la réduction de la lixiviation, soit on vise un niveau plus modeste, atteignable).

Le niveau d'exigence est le niveau d'importance donnée à la fonction ou au processus pour la modalité des critères de caractérisation du système de culture considéré (1 = priorité basse, 3 = priorité haute). Ces notes sont définies par classe de la typologie et ensuite agglomérées grâce aux pondérations précédemment définies de façon à donner une note globale d'exigence par fonction ou processus (de 1,00 à 3,00). Ce niveau permettra de proposer à l'utilisateur, en fonction de son système de culture, une priorisation des actions correctives à mettre en place.

2.4.2. L'évaluation du niveau d'atteinte des processus et fonctions, issu des mesures

L'élaboration du niveau d'atteinte, issu des mesures, se structure sur l'arborescence largement partagée dans la communauté scientifique partant des indicateurs du sol, en lien avec les propriétés, les processus, puis avec les fonctions du sol jusqu'aux services écosystémiques, rendus à la société et à l'agriculteur. Parmi les études de formalisation des réflexions sur les services écosystémiques rendus par les sols, citons tout d'abord l'étude INRAE EFESE sur les services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles (Tibi A., Therond O., 2017). De façon plus opérationnelle, Agro-Eco Sol s'appuie sur les productions d'un séminaire INRAE-ADEME (ADEME, 2019), qui a proposé une arborescence (cheminement) et un vocabulaire. Ce vocabulaire, utilisé ici dans une première phase, est à connotation scientifique, et évoluera lors des tests réalisés auprès des clients finaux agriculteurs et techniciens pour être plus compréhensible des utilisateurs.

Un extrait des processus, fonctions et services écosystémiques pouvant être renseignés dans le périmètre d'Agro-Eco Sol, est présenté sur le schéma de la Figure 4. Ils ont été établis d'après les connaissances sur les indicateurs renseignés dans Agro-Eco Sol.

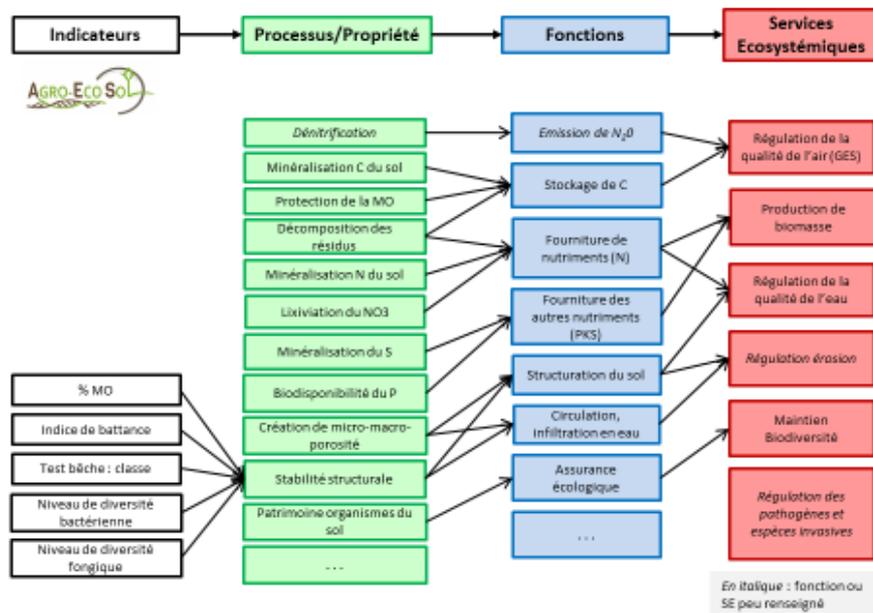


Figure 4– Arborescence des indicateurs, processus, fonctions et services écosystémiques concernés dans Agro-Eco Sol (extrait)

Chaque fonction est décomposée en processus élémentaires, eux-mêmes renseignés *in fine* par des indicateurs mesurés. C'est l'état des connaissances actuelles qui permet de construire la chaîne avec suffisamment de robustesse pour déboucher vers un conseil à l'agriculteur. En effet, seuls les indicateurs dont la relation avec un processus peut être suffisamment bien décrite peuvent être utilisés.

Le niveau d'atteinte d'un processus est le plus souvent issu de plusieurs indicateurs. Une note globale est alors construite, sur la base de pondérations construites par expertise. De même, à l'échelon supérieur, le niveau d'atteinte d'une fonction est issu d'une note globalisant les processus responsables, note construite sur la base de pondérations.

Toutefois, les indicateurs biologiques présents dans Agro-Eco Sol ne bénéficient pas tous aujourd'hui de modèles publiés ou de référentiels d'interprétation sur des travaux les mettant en relation avec des fonctions agronomiques ou environnementales. Le domaine de la fertilité biologique est encore une science jeune, seuls certains de ces indicateurs sont intégrés directement dans le moteur. De nouvelles méthodes basées sur une valorisation de l'expertise peuvent toutefois aider leur intégration, vers une évaluation d'un processus ou d'une fonction.

2.4.3. La mise en œuvre de la méthode des DAG et réseau bayésien

La première source d'information est bien sûr la connaissance formalisée existante, dans la bibliographie ou émanant des experts. Mais le projet bénéficie de l'apport d'une technique permettant de formaliser des liens de causalité sur des relations encore mal connues : le DAG (Directed Acyclic Graph) associé au réseau bayésien. Une première étape de construction graphique d'un réseau de variables (relations de causalité) associée à une seconde étape de formalisation de la distribution de ces variables, débouche sur un modèle probabiliste. Un des intérêts réside dans la possibilité d'y associer soit des modèles, soit des données, soit des relations d'experts (élicitation). Cette méthode constitue un apport important dans le cadre du projet, valorisant le grand nombre d'indicateurs et

d'experts présents. Elle a d'abord été conduite sur un processus du sol, la décomposition des matières organiques fraîches (résidus, apports organiques). Le DAG est présenté en Figure 5.

Ces travaux ont été engagés afin de croiser l'ensemble des indicateurs (facteurs agroenvironnementaux) et bioindicateurs (collemboles, vers de terre, nématodes, activités enzymatiques et microbiologie) concernés par ce processus. Ce travail a donc nécessité de nombreux ateliers afin de formaliser les probabilités que le processus de décomposition des matières organiques fraîches soit limitant ou non. Un travail de programmation sous R est ensuite nécessaire afin de formaliser l'ensemble des lois de probabilité obtenues. Cet outil qu'est le DAG a été mobilisé dans le projet car il a déjà montré son utilité dans l'évaluation de fonctions rendus par les sols (Vrebos *et al.*, 2020), et est un bon support pour organiser des sessions d'élicitation d'experts ; sessions qui ont elles aussi montré leur intérêt dans l'évaluation des services écosystémiques (Rutgers *et al.*, 2012).

D'autres DAG sont en cours de finalisation, sur les processus de minéralisation du carbone, puis de l'azote, et d'autres seront réalisés en fonction du temps disponible.

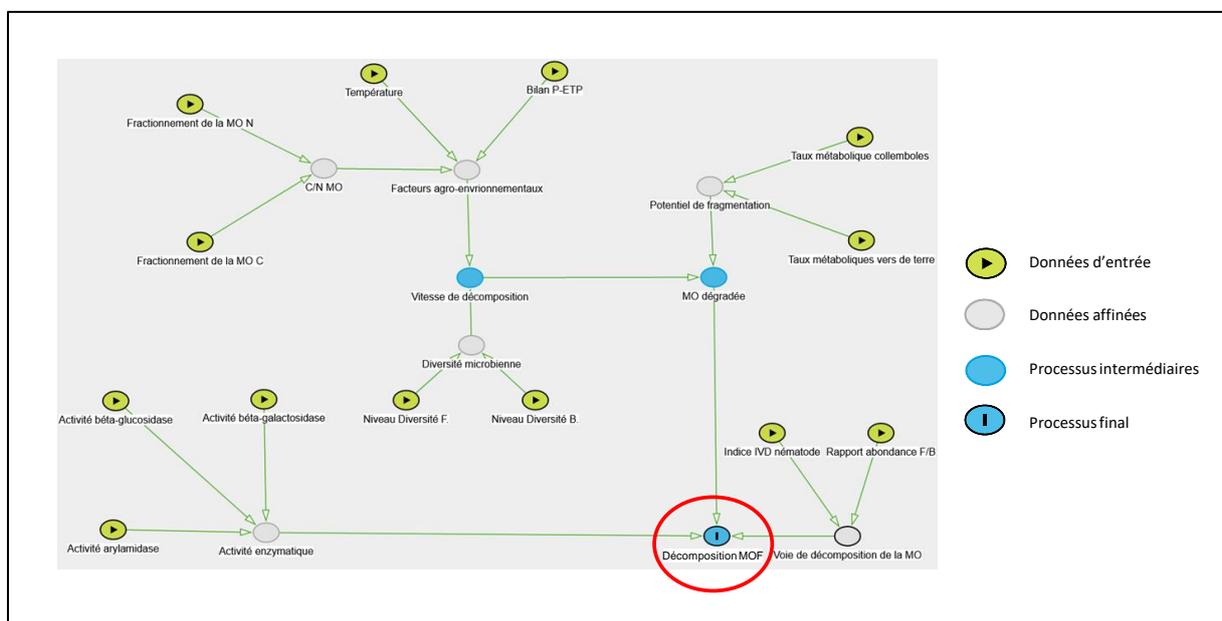


Figure 5 – Représentation du DAG sur la décomposition des MOF (Matières Organiques Fraîches)

2.4.4. Le diagnostic et le conseil

Le diagnostic est réalisé d'abord au niveau des processus. Les niveaux atteints issus des mesures sont confrontés aux niveaux attendus et souhaitables adaptés à la parcelle. Une règle de décision spécifique par processus permet de calculer une note de synthèse. Par fonction, les notes de synthèse des processus élémentaires sont agglomérées grâce à des pondérations, débouchant sur un niveau d'atteinte de la fonction, toujours noté de 1,00 à 3,00, conduisant au diagnostic de satisfaction évalué globalement en : non satisfaite, satisfaite, satisfaite au-delà des attendus (par découpage de la plage de notes).

Le conseil résultant va alors être lié au niveau d'exigence précédemment défini d'après la typologie par défaut, hiérarchisant les processus et fonctions entre eux. Il va déboucher sur le déclenchement ou non (si tout est de niveau satisfaisant) de leviers adaptés au contexte de la parcelle, proposés dans le cadre de l'agroécologie.

3. PERSPECTIVES

Les perspectives à 1 an concernent la mise en production de services chez Auréa sur les mesures des bioindicateurs et leur interprétation dans un premier temps dans le domaine de la grande culture.

Cela passera tout d'abord par la finalisation de l'écriture du moteur d'interprétation, et de la gestion des leviers déclenchés. Ensuite, de nouvelles fonctionnalités dans l'ergonomie de l'outil seront intégrées, visant la possibilité de saisie interactive par l'agriculteur de ses propres objectifs (services liés à l'environnement seulement ? liés à la production ? ...) permettant ainsi de valoriser pleinement la structure adaptative du moteur d'interprétation.

Un volet important concerne aussi le test de l'offre. Une première campagne de prélèvements, et donc de test en grandeur nature, a été lancée en 2021 sur des parcelles d'agriculteurs et sera poursuivie en 2022. Cela permettra de valider tous les maillons de la chaîne, de la formation initiale des acteurs, de la phase de terrain (prélèvement et observations), puis de laboratoire, débouchant sur la validation du contenu et de la forme restitués aux clients.

A plus long terme, l'écriture du moteur d'interprétation a déjà permis de déceler des zones « d'ombre » mal renseignées. Leur recensement va permettre d'orienter les futurs efforts de référencement sur ces situations orphelines. Sa conception permettra par ailleurs d'intégrer de façon relativement simple les nouveaux acquis de la recherche.

REMERCIEMENTS

Le projet Agro-Eco Sol est accompagné par l'ADEME dans le cadre du programme Industrie et Agriculture éco-efficientes du programme des Investissements d'Avenir. Il est coordonné par Auréa AgroSciences, en partenariat avec INRAE (UMR Agroécologie, UMR ECOSYS - Plateforme Biochem-Env, UMR Eco&sols, US InfoSol) et ARVALIS – Institut du Végétal, en collaboration avec des coopératives (Dijon Céréales, Maïsadour, Terrena), Agrosolutions, des laboratoires spécialistes de la biologie des sols (ELISOL environnement, Genoscreen, SEMSE) et des organismes de recherche publique (CEFE à l'Université de Montpellier et LECA CNRS) et d'enseignement supérieur (AgroParisTech). Biochem-Env (<https://doi.org/10.15454/HA6V6Y>) est un service de l'Infrastructure nationale de Recherche AnaEE-France, bénéficiant d'une aide de l'État français gérée par l'Agence Nationale de la Recherche au titre du Programme « Investissements d'Avenir » portant la référence ANR-11-INBS-0001.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME, 2019. Méthodologies d'évaluation des fonctions et des services écosystémiques rendus par les sols. Synthèse du séminaire du 12 juin 2019 à l'INRA d'Orléans. ADEME Expertises, Nov 2019, 31 pages.
- Cluzeau D., Guernion M., Chaussod R., Martin-Laurent F., Villenave C., Cortet J., Ruiz-Camacho N., Pernin C., Mateille T., 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*. Eur. J. of Soil Biology 49, pp 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.eisobi.2011.11.003>
- Dequiedt S., Karimi B., Chemidlin Prévost-Bouré N., Terrat S., Horrigue W., Djemiel C., Lelievre M., Nowak V., Wincker P., Jolivet C., Saby N.P.A., Arrouays D., Bispo A., Feix I., Eglin T., Lemanceau P., Maron P.A. et Ranjard L., 2020. *Le RMQS au service de l'écologie microbienne des sols français*. Etude et Gestion des Sols, 27, 51-71. <https://www.afes.fr/publications/revue-etude-et-gestion-des-sols/volume-27/>
- Joimel, S., Schwartz C., Hedde M., Kiyota S., Henning Krogh P., Nahmani J., Pérès G., Vergnes A., Cortet J., 2017. *Urban and industrial land uses have a higher soil biological quality than expected from physicochemical quality*. Science of the Total Environment 584-585, 614-621. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.086>
- Keeney D.R. 1982. Nitrogen availability and nitrogen inorganic forms. In : Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Ed. AL Page, R.H. Miller & D.R. Keeney, Agronomy Monograph 9 (2nd Edition), ASA-SSSA, Madison (WI, USA), pp 711-733.
- Moretti, M., Dias, A., de Bello, F., Altermatt, F., Chown, S.L., Azcárate, F.M., Bell, J.R., Fournier, B., Hedde, M., Hortal, J., Ibanez, S., Öckinger, E., Souza, J.P., Eilers, J., Berg, M.P., 2016. Handbook of protocols for standardized measurement of terrestrial invertebrate functional traits. Funct. Ecol. in press.
- Paoletti, M. G. 1999. The role of earthworms for assessment of sustainability and as bioindicators. Agriculture, Ecosystems & Environment 74:137-155.
- Pey, B., J. Nahmani, A. Auclerc, Y. Capowiez, D. Cluzeau, J. Cortet, T. Decaëns, L. Deharveng, F. Dubs, S. Joimel, C. Briard, F. Grumiaux, M.-A. Laporte, A. Pasquet, C. Pelosi, C. Pernin, J.-F. Ponge, S. Salmon, L. Santorufo, and M. Hedde. 2014. Current use of and future needs for soil invertebrate functional traits in community ecology. Basic and Applied Ecology 15:194-206.
- Puissant, J., Villenave, C., Chauvin, C., Plassard, C., Blanchart, E., Trap, J. 2021. Quantification of the global impact of agricultural practices on soil nematodes: A meta-analysis. Soil Biology and Biochemistry. <https://doi:10.1016/j.soilbio.2021.108383>
- Rutgers, M., van Wijnen, H.J., Schouten, A.J., Mulder, C., Kuiten, A.M.P., Brussaard, L., Breure, A.M., 2012. A method to assess ecosystem services developed from soil attributes with stakeholders and data of four arable farms. Science of The Total Environment, Ecosystem Functions, Ecosystem Services and Biodiversity in Ecological Risk Assessment 415, 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.041>
- Schulte, R.P.O., Bampa, F., Bardy, M., Coyle, C., Creamer, R.E., Fealy, R., Gardi, C., Ghaley, B.B., Jordan, P., Laudon, H., O'Donoghue, C., Ó'hUallacháin, D., O'Sullivan, L., Rutgers, M., Six, J., Toth, G.L., Vrebos, D., 2015. Making the Most of Our Land: Managing Soil Functions from Local to Continental Scale. Frontiers in Environmental Science 3, 81. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2015.00081>
- Terrat S., Plassart P., Bourgeois E., Ferreira S., Dequiedt S., et al., 2015. Meta-barcoded evaluation of the ISO standard 11063 DNA extraction procedure to characterize soil bacterial and fungal community diversity and composition. Microbial Biotechnology, Wiley, 8 (1), pp.131-142.
- Tibi A., Therond O. 2017. Evaluation des services écosystémiques rendus par les écosystèmes agricoles. Une contribution au programme EFSE. Synthèse du rapport d'étude, Inra (France), 118 pages.
- Vrebos, D., Jones, A., Lugato, E., O'Sullivan, L., Schulte, R., Staes, J., Meire, P., 2020. Spatial evaluation and trade-off analysis of soil functions through Bayesian networks. European Journal of Soil Science n/a. <https://doi.org/10.1111/ejss.13039>
- Weil R.R., Islam K.R., Stine M.A., Samson-Liebig S.E., 2003. Estimating active carbon for soil quality assessment: a simplified method for laboratory and field use. American Journal of Alternative Agriculture, 18, pp 3-17.