

➤ L'importance des indicateurs de qualification des sols et de leur évolution

Isabelle Cousin¹, Christian Bockstaller²

¹ INRAE, UR Sols, Orléans, France

² INRAE, UMR LAE, Colmar; France

INRAE

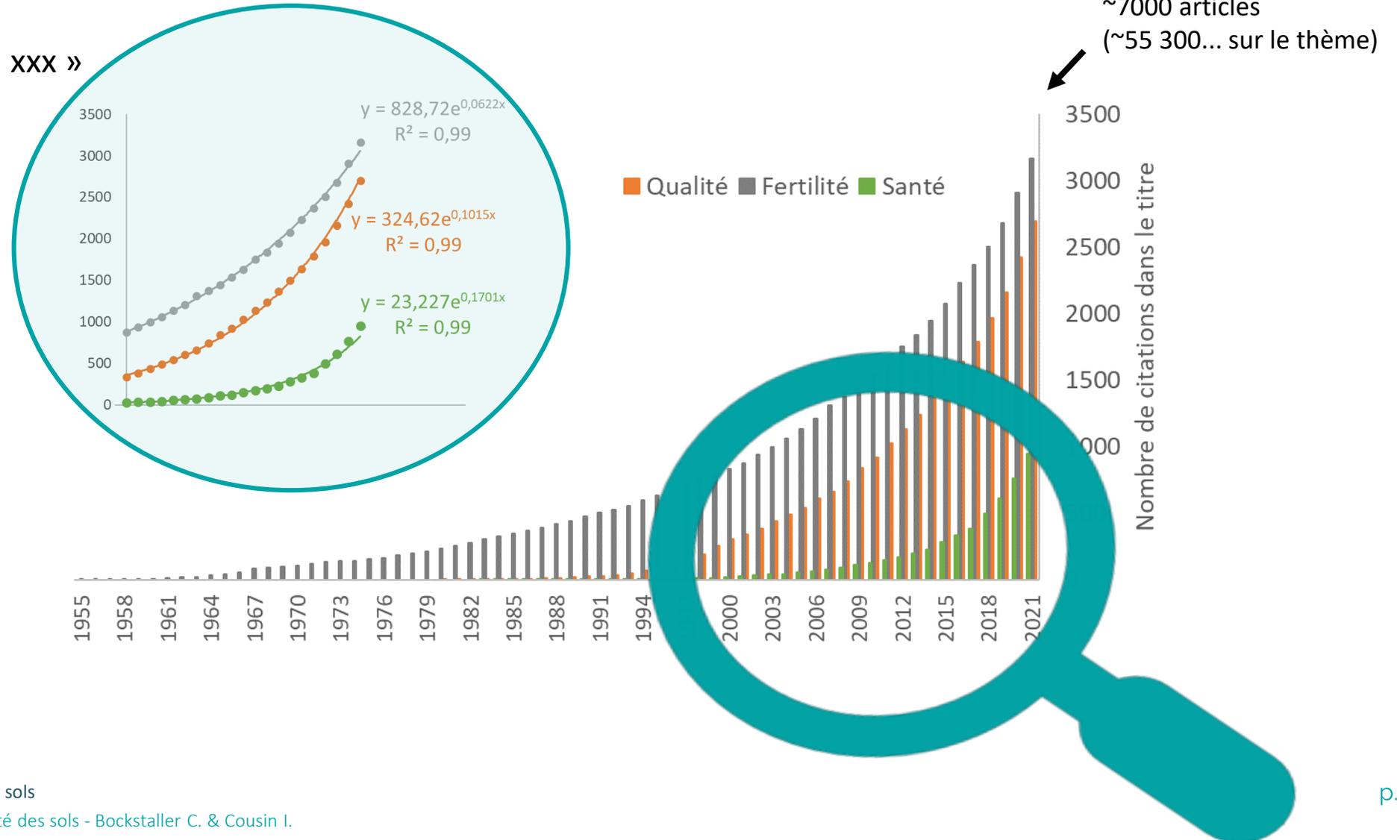
➤ Plan

- 1. Des définitions, perceptions, enjeux**
2. Des indicateurs

➤ Qualité et santé dans la littérature scientifique

Interrogation du WOS

- Juin 2022
- TITRE = « soil* » and « xxx »



INRAE

Indicateurs de qualification des sols

9 novembre 2022 - CIAG Qualité des sols - Bockstaller C. & Cousin I.

➤ Fertilité des sols... un concept toujours d'actualité



« La fertilité est la **facilité avec laquelle la racine peut bénéficier dans le sol des différents facteurs de croissance: chaleur, eau, éléments chimiques nécessaires à la plante, substances organiques de croissance** ». (Morel, 1989, cité par Chaussod, 1996)

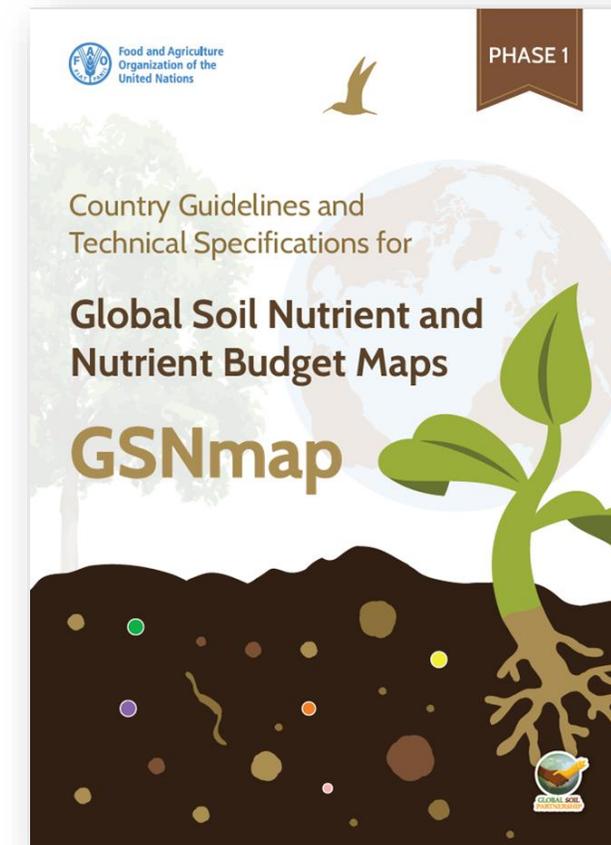
« Un sol est fertile lorsqu'il
i) présente une **faune et une flore variées et biologiquement actives** [...] ii) permet une **croissance normale des végétaux** sans nuire à leurs propriétés iii) garantit une bonne **qualité des produits** ». (Haberli et al., 1991, cité par Gobat et al., 2010)

(CIAG, 2012
Evaluer et gérer la fertilité des sols)

“Soil fertility is the **ability of a soil to sustain plant growth** by providing **essential plant nutrients** and favorable chemical, physical, and biological characteristics as a **habitat** for plant growth.

Plant nutrients include the **macronutrients** nitrogen, phosphorus and potassium, sulfur, calcium and magnesium. **Micronutrients** are essentially boron, chlorine, copper, iron, manganese, molybdenum and zinc.

Fertilizers are chemical or natural substance or material that is used to provide nutrients to plants, usually via application to the soil, but also to foliage or through water in rice systems, fertigation or hydroponics or aquaculture operations. Nutrient sources include chemical and mineral fertilizers, organic fertilizers, such as livestock manures and composts and sources of recycled nutrients.” (FAO, Global Soil Partnership, 2020)



Juin 2022 Novembre

Le concept de « **fertilité révélée** » : « [On] pourrait [s']autoriser à définir un sol fertile comme un sol qui, pour produire une quantité donnée de produits consommables (estimée en unités énergétiques), va requérir la quantité minimale d'énergie. » (Fardeau, EGS, 2015)



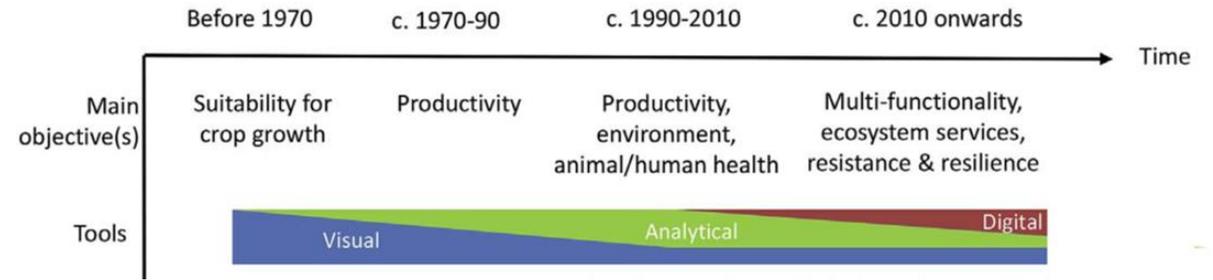
INRAE

Indicateurs de qualification des sols

9 novembre 2022 - CIAG Qualité des sols - Bockstaller C. & Cousin I.

➤ Qualité, santé, une longue histoire...

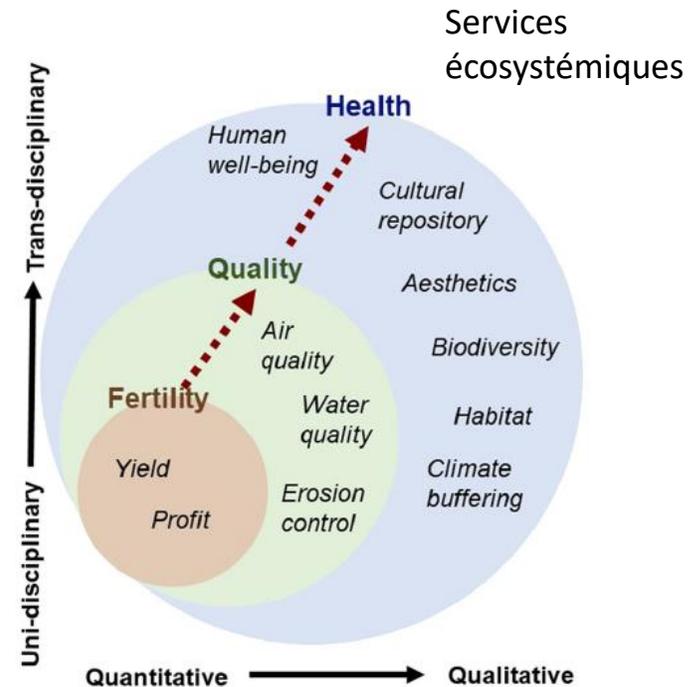
Qualité des sols : « capacité du sol à **remplir ses fonctions** pour permettre la **production animale et végétale**, maintenir la **qualité de l'eau et de l'air** et **soutenir la santé humaine** » (Karlen et al., 1997)



(Bünemann et al., 2018)

Braumann, 2022

<https://www.canal-u.tv/chaines/fire/alain-brauman-pourquoi-la-qualite-et-la-sante-des-sols-ne-sont-pas-equivalents-pour-2>



(Janzen et al., 2021)



INRAE

Indicateurs de qualification des sols

9 novembre 2022 - CIAG Qualité des sols - Bockstaller C. & Cousin I.

➤ Un sol (européen) en bonne santé



Bruxelles, le 17.11.2021
COM(2021) 699 final

**COMMUNICATION DE LA COMMISSION AU PARLEMENT EUROPÉEN, AU
CONSEIL, AU COMITÉ ÉCONOMIQUE ET SOCIAL EUROPÉEN ET AU COMITÉ
DES RÉGIONS**

**Stratégie de l'UE pour la protection des sols à l'horizon 2030
Récolter les fruits de sols en bonne santé pour les êtres humains, l'alimentation, la
nature et le climat**

{SWD(2021) 323 final}

Qu'est-ce qu'un sol en bonne santé?

Un sol sain est un sol en bonne santé chimique, biologique et physique et qui est par conséquent à même de fournir en permanence le plus grand nombre possible de ces services écosystémiques:

- assurer la production d'aliments et de biomasse, y compris dans les secteurs de l'agriculture et de la foresterie;
- protéger les nappes aquifères en absorbant, en stockant et en filtrant l'eau, et en transformant les éléments nutritifs et autres substances;
- fournir les éléments essentiels à la vie et à la biodiversité, y compris les habitats, les espèces et les gènes;
- jouer le rôle de réservoir de carbone;
- servir de plateforme pour les activités humaines et constituer un élément du patrimoine culturel;
- être une source de matières premières;
- constituer une archive du patrimoine géologique, géomorphologique et archéologique.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021DC0699>



INRAE

Indicateurs de qualification des sols

9 novembre 2022 - CIAG Qualité des sols - Bockstaller C. & Cousin I.

➤ Qualité et santé : potentiel et performance ?

Caractéristiques et propriétés du sol	
manageables	(horizon « de surface ») <ul style="list-style-type: none"> ▪ pH ▪ Teneur en MO ▪ (Masse volumique) ▪ Infiltrabilité ▪ Rétention en eau ▪ ...
intrinsèques	(Tous horizons) <ul style="list-style-type: none"> ▪ Texture ▪ Teneur en éléments grossiers ▪ Succession des horizons ▪ (Pente) ▪ ...



Performance / potentiel
 ↑
SANTE (des sols)
 Propriétés **manageables** (?)

Système =
SOL – BIOTE - PRATIQUES

Système =
SOL – BIOTE

Système =
SOL

QUALITE des sols
 Propriétés **intrinsèques**

↓
Niveau de potentialité que le sol peut atteindre

« **soil capability** , intrinsic capacity of soil to contribute to ecosystem services» (Bouma et al., 2017)



➤ Qualité, santé, des acceptions et des perceptions

QUALITE

- I.
« Condition, situation » → état (« En qualité de... »)
(Robert, 2021)
« Ce qui fait qu'une chose est telle » (Littré, 1871)
« Manière d'être » (dic. étymologique -> dès XII^{ème} S.)

- II.
« Manière d'être non mesurable (d'une chose) qui donne une **valeur** plus ou moins grande » (Robert, 2021)
« Manière d'être **bonne** » (dic. étymologique, XV^{ème} S.)
« Ce qui fait la **valeur** » (dic. moyen français)

SANTE

moins à l'origine). Il apparaît également que le fait de faire appel à une conception du sol comme **corps vivant** fait écho à de nombreuses conceptions populaires du sol qui est souvent comparé au **corps humain**. Cette conception du sol induit toute une série de termes telle que, **soigner, régénérer, nourrir, prendre soin** (Barrera-Bassols 2010). Ce lexique lié à la santé induit de ce fait un rapport au sol beaucoup plus enclin à l'attention et la considération du vivant dans le sol que celui lié à la qualité, à laquelle sont plutôt liés les termes d'aptitude, de capacité à produire, de fertilité, de rendement.

(Richelle, 2019)



Enriching Soil, Enhancing Life

Enriching soil enhances life from the microscopic scale to the global scale. Adopting soil health systems can increase microbial diversity, improve farmer livelihood, increase agricultural productivity, and build climate resilience. As a result, downstream communities receive cleaner water, ecosystem health is restored, rural landscapes are sustained, and climate change is held in check for future generations.



Harnessing our collective strengths to bring about a step change in more sustainable soil health practices over the next decade



INRAE

Indicateurs de qualification des sols

9 novembre 2022 - CIAG Qualité des sols - Bockstaller C. & Cousin I.

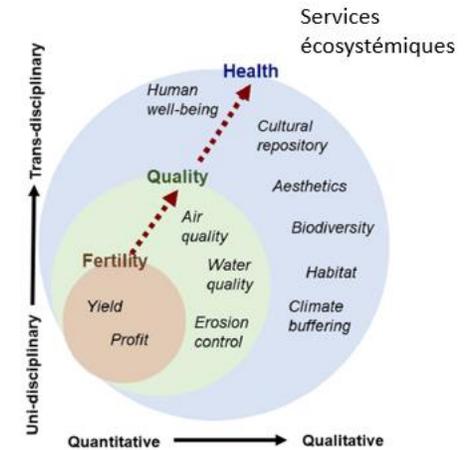
INRAE

➤ Plan

1. Des définitions, perceptions, enjeux
- 2. Des indicateurs**

➤ Introduction

- Fertilité → Qualité des sols → Santé des sols
- Grand enjeu pour la transition agroécologique
 - pour la réduction des intrants
 - Via la fourniture des services écosystémiques
- Nécessité d'évaluer les impacts des pratiques agricoles
- Mesure directe impossible : utilisation **d'indicateurs**

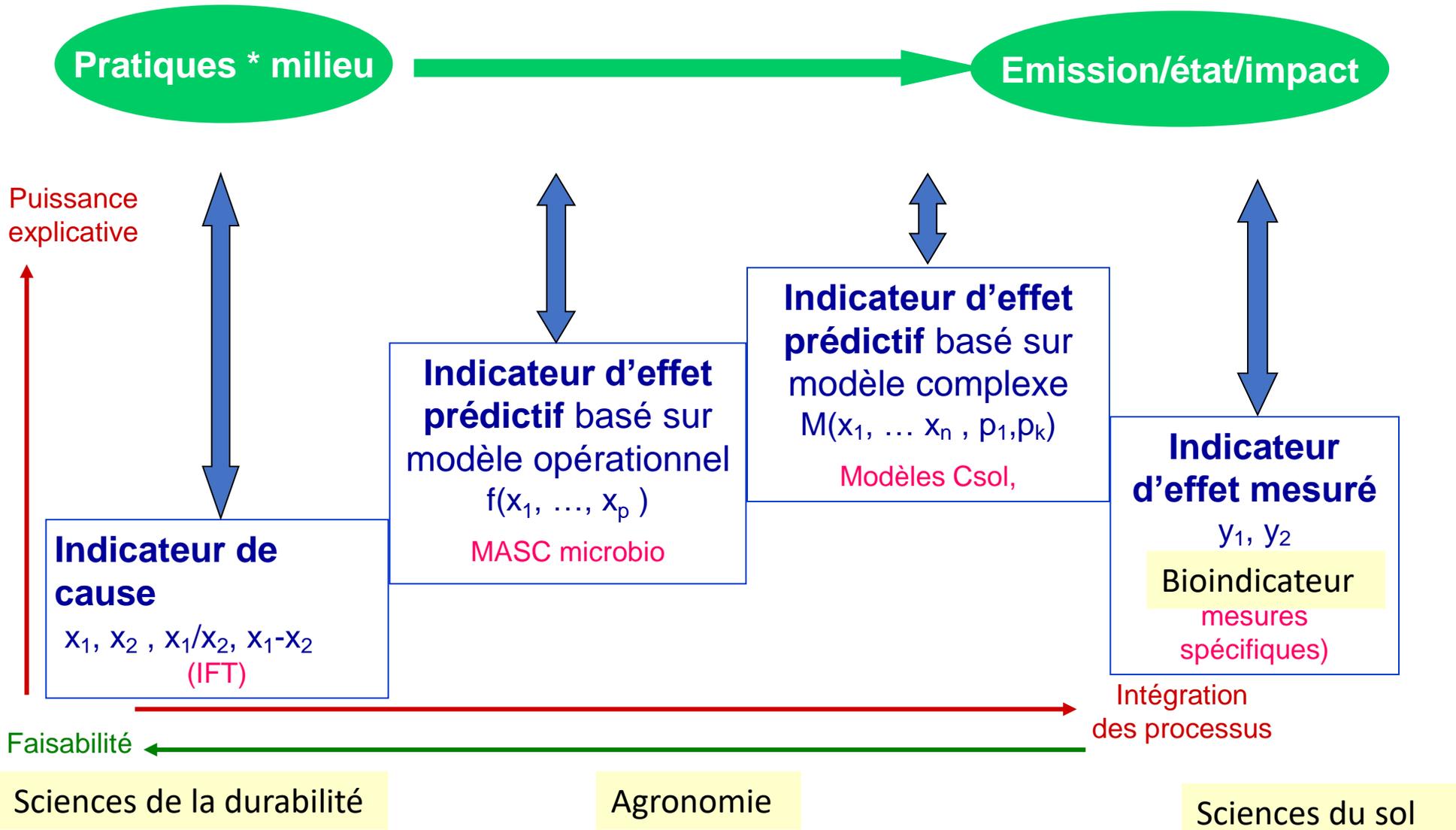


➤ Choix préalables

- Préciser la finalité de l'évaluation - **pour quoi** et **pour qui** ?
 - «Prendre une photo » → suivi, comparaison de situations
 - Améliorer les pratiques → conception système, conseil, etc.
- Définir les **objectifs opérationnels** - on évalue **quoi** ?)
 - Quels critères de qualité
- Définir les **limites du système évalué** et les **échelles de l'évaluation**
 - spatiales **où** ?, temporelles **quand** ?
 - Spatial: parcelle
 - Temporel: temps de réponse ?
- Préciser **les méthodes, les moyens** - **comment** ?
 - Mesures de terrain coûteuses
 - Différents types d'indicateurs



➤ Différents types d'indicateurs



Comment définir la qualité (ou rester dans une note globale non explicite ?)



INRAE

Indicateurs de qualification des so
 9 novembre 2022 - CIAG Qualité c

Bockstaller et al., 2015;
 Lairez, Feschet et al. 2015

➤ Des indicateurs physiques et chimiques aux indicateurs biochimique et biologique

- Indicateurs physiques et chimiques plus faciles d'accès
- Mais présentent des limites :
 - Temps de réponse lent aux perturbations
 - Ne peuvent pas jouer un rôle d'alerte précoce
- Indicateurs biochimiques et biologiques
 - Activité enzymatiques
 - Abondance et diversité
 - Microorganismes (bactéries, champignons)
 - Mycorhizes
 - Micro arthropodes (ex: nématodes)
 - Méso arthropodes (ex: collemboles)
 - Macro arthropodes (ex: ver de terre)

**Indicateur
d'effet mesuré**

Y_1, Y_2

(analyse terre,
mesures
spécifiques)



Mesures en routines



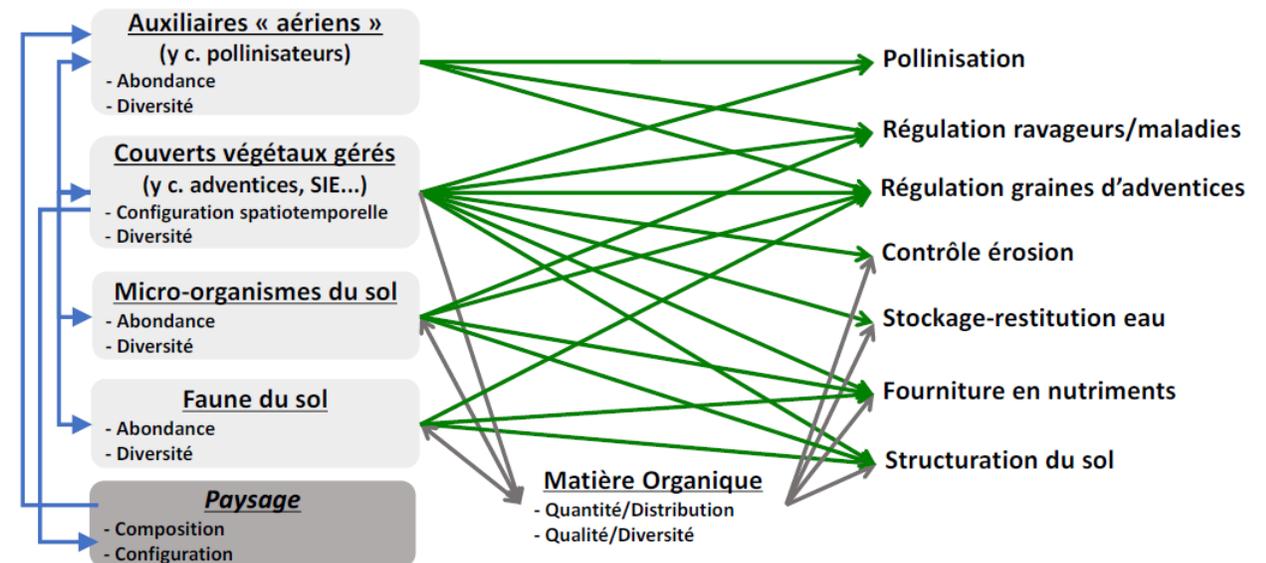
Faisabilité (sauf vers de terre)

➤ La matière organique du sol

- Indicateur plébiscités par des agriculteurs (n=28) (Roming et al. 1995)
- Accessible par analyse de terre et observation

Indicateur d'effet mesuré
 Y_1, Y_2
(analyse terre, mesures spécifiques)

- Rôle central dans la fourniture de services écosystémiques (Therond et Duru 2019)



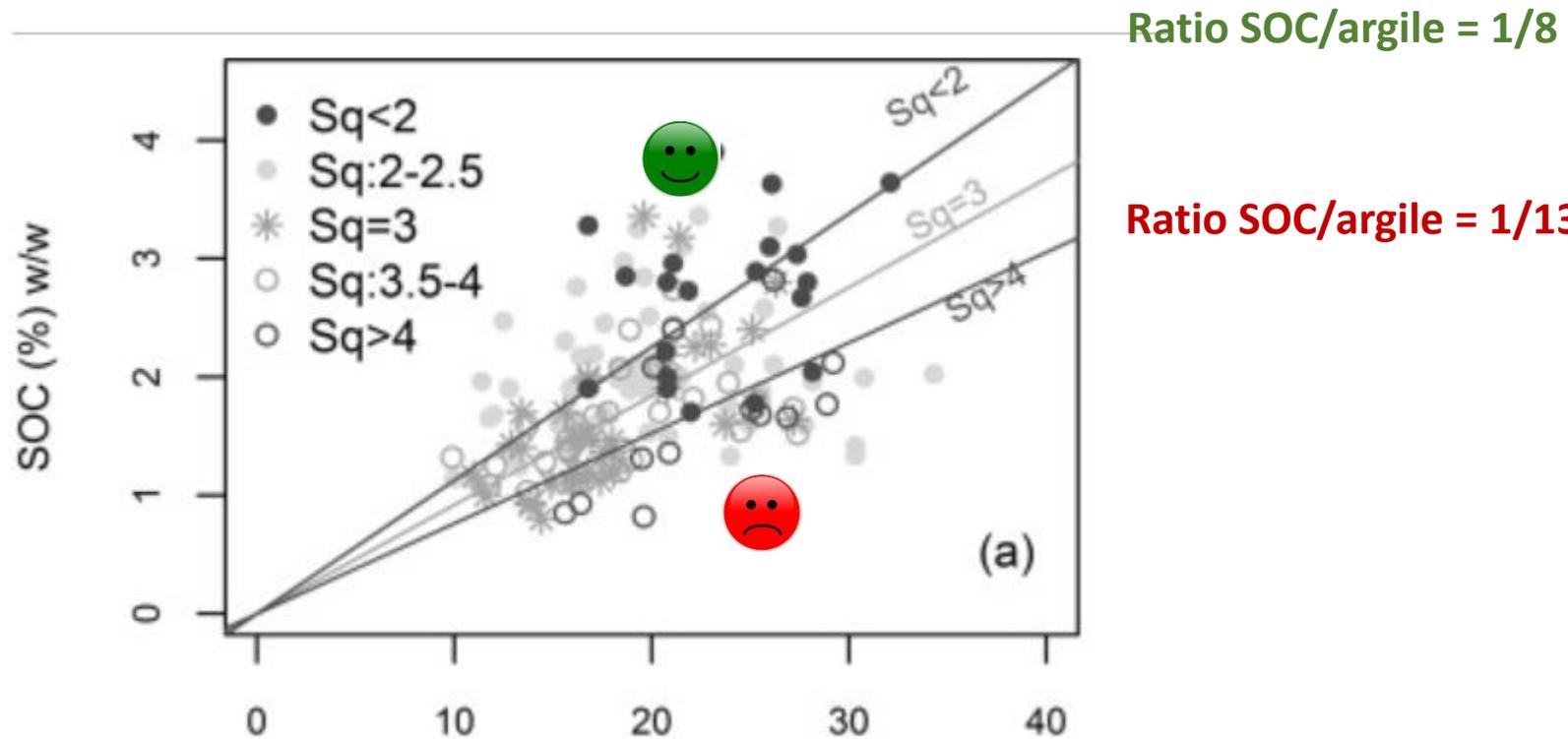
➤ Un indicateur dérivé de la matière organique

Indicateur
d'effet mesuré

Y_1, Y_2

(analyse terre,
mesures
spécifiques)

- Ratio carbone organique du sol (SOC)/argile (Johannes et al., 2017)



➤ Indices biologiques (1/2) (Paz-Ferreiro et Fu 2013)

**Indicateur
d'effet mesuré**

Y_1, Y_2

(analyse terre,
mesures
spécifiques)

- Indices simples
 - Quotient métabolique (respiration basique par unité biomasse de carbone microbien)
 - Quotient microbien (biomasse de carbone microbien du sol par unité de carbone du sol)
 - Activités enzymatiques (ex: phosphatase)



Propositions de seuils (pour le carbone)



Un paramètre unique pour évaluer une réalité complexe ?

➤ Indices biologiques (2/2) (Paz-Ferreiro et Fu 2013)

**Indicateur
d'effet mesuré**

Y_1, Y_2

(analyse terre,
mesures
spécifiques)

Reference	Mathematical expression	Units
Hinojosa <i>et al.</i> (2004)	$GMea = (\text{acid phosphatase} \times \text{alkalyne phosphatase} \times \beta\text{-glucosidase} \times \text{arylsulphatase} \times \text{urease})^{1/5}$	$\mu\text{mol product g}^{-1} \text{ h}^{-1}$.
Puglisi <i>et al.</i> (2005)	$SAI = -57.05 \cdot \mathbf{13:0} + 9.85 \cdot \mathbf{14:0} - 10.24 \cdot \mathbf{15:0} + 0.56 \cdot \mathbf{16:0} - 18.76 \cdot \mathbf{17:0} + 3.35 \cdot \mathbf{18:0} + 9.85 \cdot \mathbf{20:0} + 35.58 \cdot \mathbf{23:0} - 29.53 \cdot \mathbf{24:0} - 2.72 \cdot \mathbf{16:1\omega7c} - 7.42 \cdot \mathbf{18:1\omega9t} - 2.51 \cdot \mathbf{18:2\omega6} + 18.01 \cdot \mathbf{18:3\omega3} - 1.26 \cdot \mathbf{20:5\omega3} + 15.67 \cdot \mathbf{cy19:0}$	Terms in bold are the molar percentages of each PLFA
Bastida <i>et al.</i> (2006)	$MDI = [0.89(1/(1 + (\text{dehydrogenase}/4.87)^{-2.5}))] + [0.86(1/(1 + (\text{WSCh}/11.09)^{-2.5}))] + [0.84(1/(1 + (\text{urease}/1.79)^{-2.5}))] + [0.75(1/(1 + (\text{WSC}/95.03)^{-2.5}))] + [0.72(1/(1 + (\text{respiration}/18.01)^{-2.5}))]$	dehydrogenase and urease ($\text{mg product g}^{-1} \text{ h}^{-1}$), WSCh and WSC (mg kg^{-1}) respiration ($\text{mg CO}_2\text{-C kg}^{-1} \text{ soil}$).
Puglisi <i>et al.</i> (2006)	$AI1 = -21.30 \cdot \text{arylsulphatase} + 35.2 \cdot \beta\text{-glucosidase} - 10.20 \cdot \text{phosphatase} - 0.52 \cdot \text{urease} - 4.53 \cdot \text{invertase} + 14.3 \cdot \text{dehydrogenase} + 0.003 \cdot \text{phenoloxidase}$ $AI2 = 36.18 \cdot \beta\text{-glucosidase} - 8.72 \cdot \text{phosphatase} - 0.48 \cdot \text{urease} - 4.19 \cdot \text{invertase}$ $AI3 = 7.87 \cdot \beta\text{-glucosidase} - 8.22 \cdot \text{phosphatase} - 0.49 \cdot \text{urease}$	$\mu\text{mol product g}^{-1} \text{ h}^{-1}$.
García-Ruiz <i>et al.</i> (2008, 2009)	$GMea = (\text{acid phosphatase} \times \text{alkalyne phosphatase} \times \beta\text{-glucosidase} \times \text{arylsulphatase} \times \text{dehydrogenase} \times \text{PN})^{1/6}$	$\mu\text{mol product g}^{-1} \text{ h}^{-1}$.

Un ensemble d'indicateurs
d'activité enzymatique



Absence de valeur unique

Des indices basés sur une
agrégation d'indicateurs



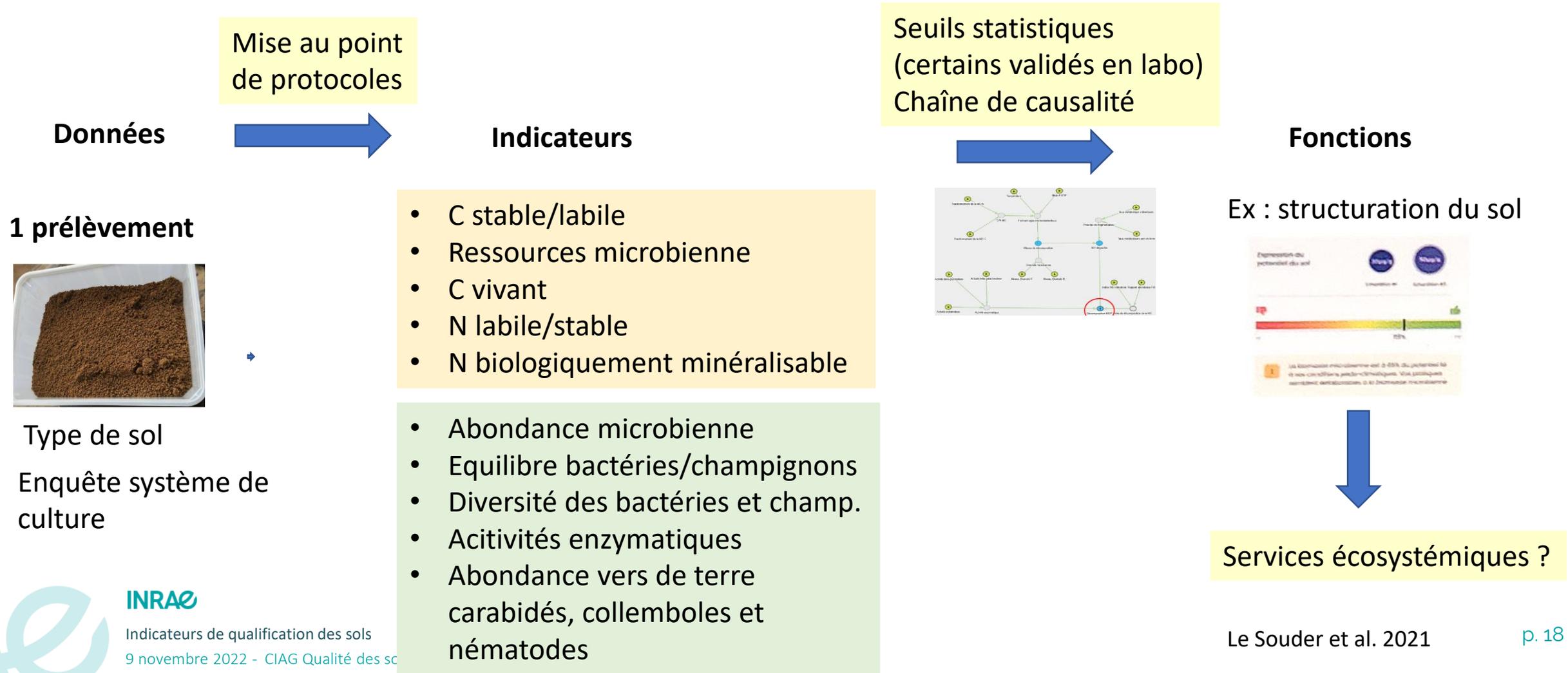
Validation sur le terrain (AI3)



Absence de seuils

➤ Une méthode opérationnelle: Agro-Ecol Sol (2023)

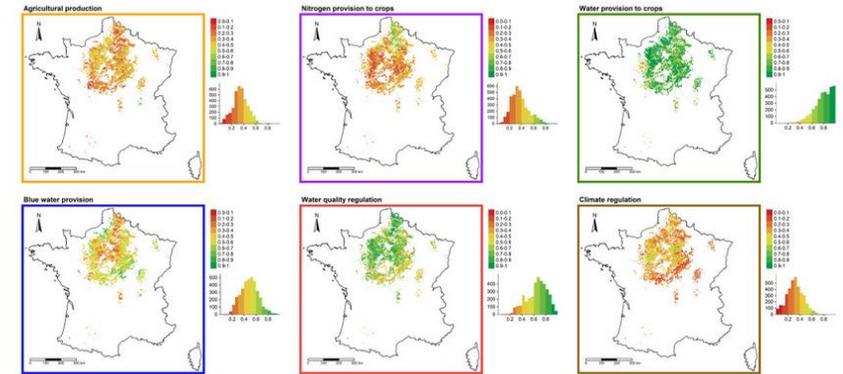
- Projet ADEME: Aurea Arvalis avec appui INRAE, etc.
- Rendre opérationnel des indicateurs issus de la recherche pour analyses en routine



➤ Indicateurs de services écosystémiques liés aux sols

(Obiang Ndong et al. 2020)

- Production agricole (MJ/ha)
- Fourniture N du sol (MO, résidus, fixation) (kg N/ha)
- Eau verte (quantité eau transpirée sans irrigation)
- Eau bleue (précipitations-transpiration)
- Part N non lessivée (par rapport N apporté et N fourni par sol)
- Stockage C



Travail de recherche : modélisation avec modèle STICS

➤ Des approches prédictives (1/2)

Indicateur d'effet
prédictif basé sur
modèle opérationnel
 $f(x_1, \dots, x_p)$
MASC microbio

- Besoin des agronomes
 - pour prédire effet des pratiques agricoles, des systèmes de culture
- Peu pris en compte dans les méthodes multicritères sauf pour l'érosion (Soulé et al. 2021)
- Des travaux avec l'outil DEXi (Bohanec et al. 2008)



Outil très convivial

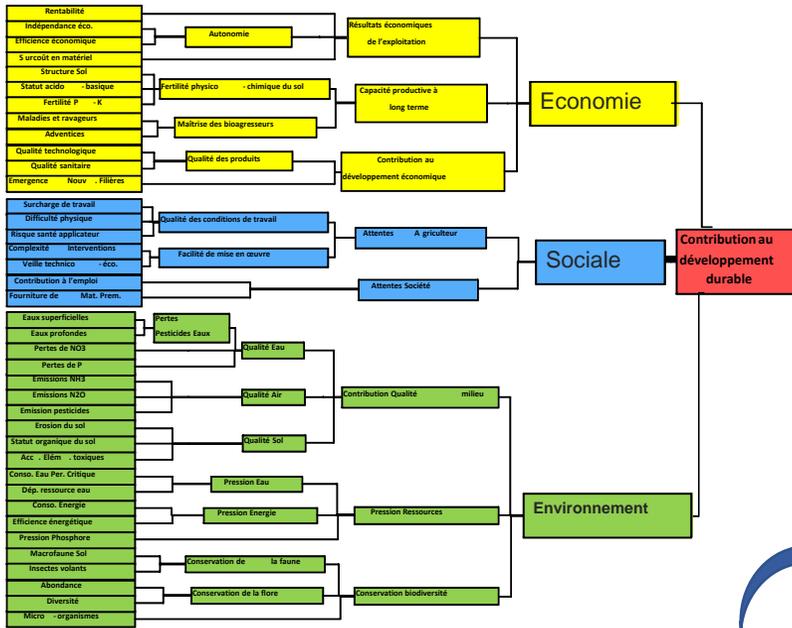


Effet de seuil, transparence (si pondération automatique)



➤ Des approches prédictives (2/2)

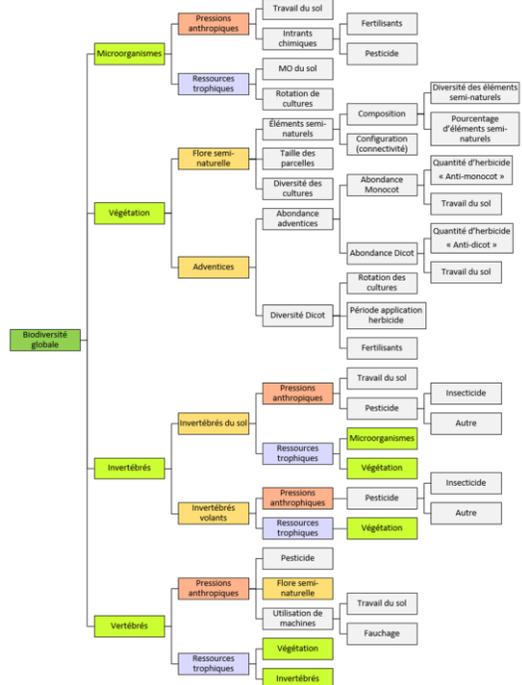
MASC 2.0 (Craheix et al. 2012)



- Microorganismes
- Macrofaunes sol

$f(\text{Apports MO, } W \text{ sol, pesticides})$

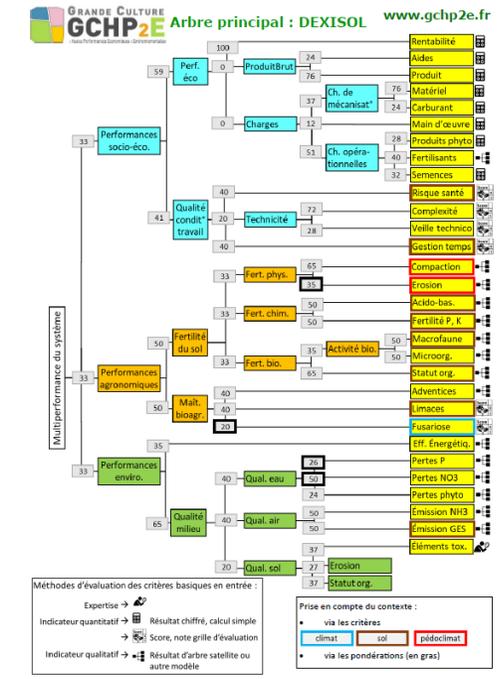
I-BIO (Soulé et al. révision)



- Microorganismes
- Invertébrés du sol

$f(\text{Pression anthropiques, ressources trophiques})$

DEXiSol (Thibault et al. 2018)



- Microorganismes - bactéries
- champignons
- Macrofaunes:- vers de terre - anéciques
- endogés
- autres arthropodes

$f(\text{Qualité milieu, apports MO, labour})$



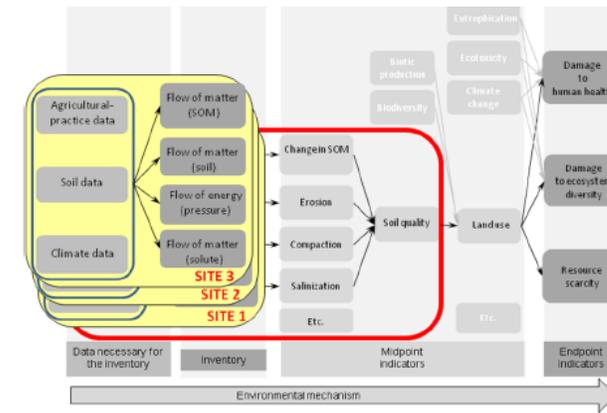
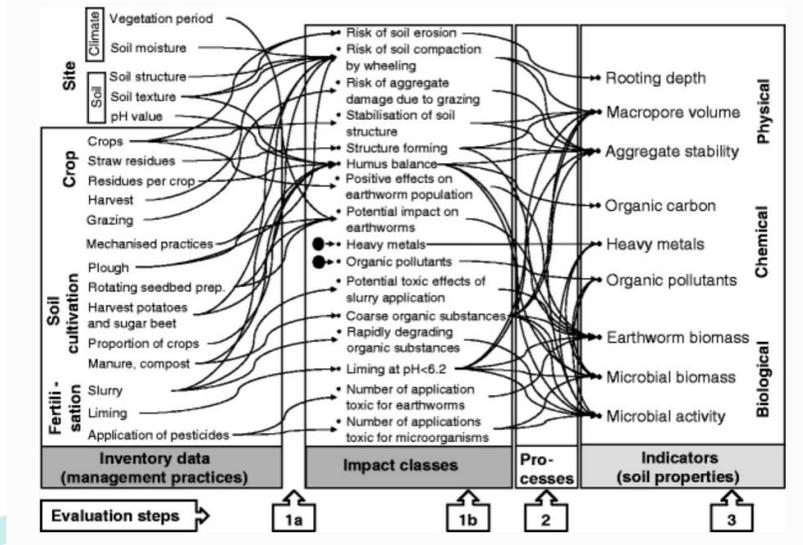
➤ Approches en analyse de cycle de vie

- Très utilisée en évaluation environnementale
 - Ex: affichage environnemental des aliments
- Qualité des sols peu abordée
- Des propositions

Indicateur d'effet prédictif basé sur modèle opérationnel
 $f(x_1, \dots, x_p)$
 MASC microbio

SALCA soil quality (Oberholzer et al. 2012)

Modèles INRAE (Guarrigues et al. 2012)

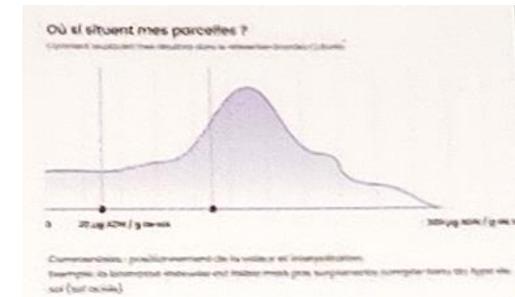


Système de notation et moyenne pondérée

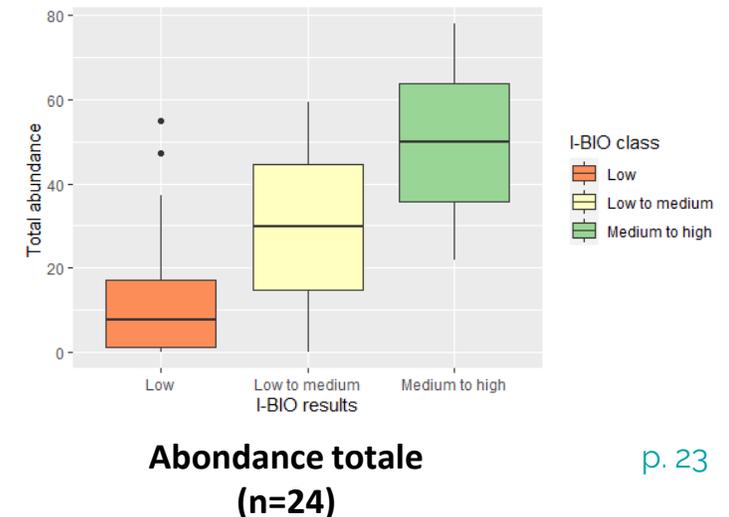
Modèles de simulation (RUSLE, Roth-C, modèle structure sol Garrigues et al. 2013)

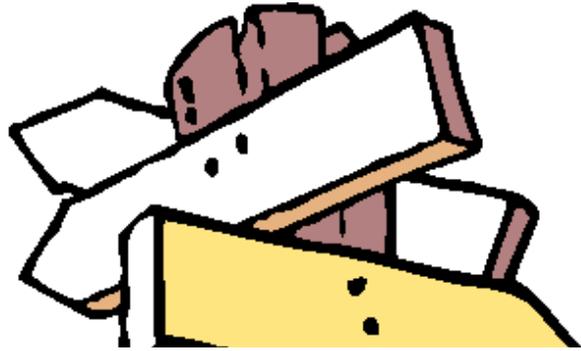
➤ Conclusions

- Sélection en fonction des choix préalables
- Indicateur mesuré vs. approche prédictive
- Questions des seuils
 - Pas toujours disponibles, basés sur statistiques, certains validés au labo
 - Des travaux en cours pour création de référentiel
- Validité des indicateurs
 - Des tentatives de validation
 - Ex: indicateurs vers de terre et microorganismes (Soulé et al. Révision)
- Vers des méthodes opérationnelles

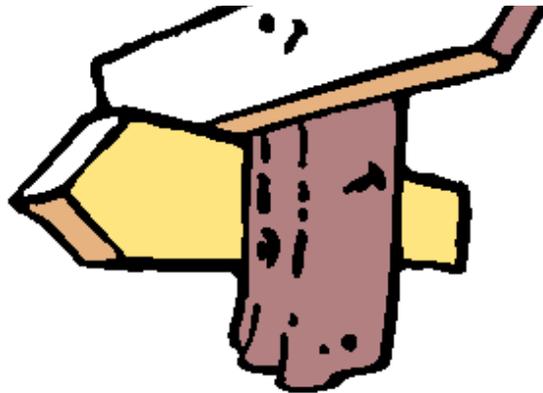


Vers de terre





Merci pour votre attention



> Références

- Bouma, J., Van Ittersum, M.K., Stoorvogel, J.J., Batjes, N.H., Droogers, P., Pulleman, M.M., 2017. Soil capability: exploring the functional potentials of soils. In: Field, D.J.e.a. (Ed.), *Global Soil Security*. Springer International Publishing, Switzerland, pp. 27–44.
- Bunemann, E. K., et al., 2018. "Soil quality - A critical review." *Soil Biology & Biochemistry* 120: 105-125.
- Chaussod R., 1996. La qualité biologique des sols : évaluations et implications. *Etude et Gestion des Sols* 3, 4, 261-278.
- Doran, J.W. and Zeiss, M.R., 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of Soil Quality. *Applied Soil Ecology*, 15: 3-11.
- Fardeau, J.C., 2015. Des indicateurs de la fertilité des sols. *Etude et Gestion des Sols*, 22, 77-100
- Gobat J.M., Aragno M., Matthey W., 2010. *Le Sol vivant*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 817 p.
- Häberli R., Lüscher C., Praplan-Chastenay B., Wyss C., 1989. *L'affaire SOL. Pour une politique raisonnée de l'utilisation des sols*. Ed Georg, Genève.
- Janzen, H.H., Janzen, D.W., gregorich, E.G., 2021, The Soil Health metaphor: illuminating or illusory ? *Soil Biology and Biogeochemistry*, 159, 108167,
- Karlen, D.L., Andrews, S.S. and Doran, J.W., 2001. Soil quality: Current concepts and applications. *Advances in Agronomy*, Vol 74, 74: 1-40.
- Morel R., 1989. La fertilité des sols. In : *Fertilita des suolo e nutrizione delle piante*. SISS et SICA eds, 57-73.
- Richelle L., 2019. De la fertilité des sols à la santé de la terre. Retour sur un processus d'apprentissage collectif visant l'évaluation de la santé des sols cultivés en agriculture paysanne. Thèse de l'Université de Namur, 638 p.

- Bockstaller, C., Feschet, P., Angevin, F., 2015. Issues in evaluating sustainability of farming systems with indicators. *OCL - Oilseeds fats* 22.
- Bohanec, M., Messean, A., Scatasta, S., Angevin, F., Griffiths, B., Krogh, P.H., Znidarsic, M., Dzeroski, S., 2008. A qualitative multi-attribute model for economic and ecological assessment of genetically modified crops. *Ecol. Modell.* 215, 247–261. Christel, A., Maron, P.-A., Ranjard, L., 2021. Impact of farming systems on soil ecological quality: a meta-analysis. *Environ. Chem. Lett.* 2021 1, 1–23.
- Craheix, D., Angevin, F., Bergez, J.E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Doré, T., 2012. MASC 2.0, un outil d'évaluation multicritère pour estimer la contribution des systèmes de culture au développement durable. *Innovations Agronomiques* 20, 35-48 . *Innov. Agron.* 20, 35–48.
- Garrigues, E., Corson, M.S., Angers, D.A., van der Werf, H.M.G., Walter, C., 2012. Soil quality in Life Cycle Assessment: Towards development of an indicator. *Ecol. Indic.* 18, 434–442.
- Garrigues, E., Corson, M.S., Angers, D.A., Van Der Werf, H.M.G., Walter, C., 2013. Development of a soil compaction indicator in life cycle assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 18, 1316–1324.
- Johannes, A., et al. 2017. Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter? *Geoderma* 302, 14–21.
- Lairez, J., Feschet, P., Aubin, J., Bockstaller, C., Bouvarel, I., 2015. *Evaluer la durabilité en agriculture - Guide pour l'analyse multicritère en productions animales et végétales*. Editions Quae., Versailles, France.
- Le Souder et al. 2021 *Agro-Eco Sol*, un outil de diagnostic des fonctions du sol basé sur des bioindicateurs 15^e Rencontres Comifer-Gemas 24-25 nov 2021 – Clermont-Ferrand
- Oberholzer, H.R., Knuchel, R.F., Weisskopf, P., Gaillard, G., 2012. A novel method for soil quality in life cycle assessment using several soil indicators. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 639–649.
- Obiang Ndong, G., Therond, O., Cousin, I., 2020. Analysis of relationships between ecosystem services: A generic classification and review of the literature. *Ecosyst. Serv.*
- Paz-Ferreiro, J., Fu, S., 2016. Biological Indices for Soil Quality Evaluation: Perspectives and Limitations. *L. Degrad. Dev.* 27, 14–25.
- Romig, D.E., Garlynd, M.J., Harris, R.F., McSweeney, K., 1995. How farmers assess soil health and quality. *J. Soil Water Conserv.* 50, 229–236.
- Soulé, E., Michonneau, P., Michel, N., Bockstaller, C., 2021. Environmental sustainability assessment in agricultural systems: A conceptual and methodological review. *J. Clean. Prod.* 325, =
- Therond, O., Duru, M., 2019. Agriculture et biodiversité: les services écosystémiques, une voie de réconciliation. *Innov. Agron.* 75, 29–47.
- Thibault C. Cavan N. Labreuch J. Métails P. Angevin F. 2018. Multicriteria Assessment of the Effects of Tillage Practices on Cropping Systems: Development of the Decision Support Tool DEXiSol Actes ISTRO 2018 Paris.