



Colloque du 20 novembre 2024 - Restitution de l'étude

# Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs





Colloque du 20 novembre 2024 - Restitution de l'étude

[Slido.com - Code #4140 882](https://www.slido.com/joincode/4140882)





## ➤ Introduction

- **Béatrice MICHALAND**, Ministère de la Transition Ecologique, de l’Energie, du Climat et de la Prévention des Risques (MTEECPR)
- **Paul HENNART**, Ministère de l’Agriculture, de la Souveraineté Alimentaire et de la Forêt (MASAF)
- **Bénédicte AUGÉARD**, Office Français de la Biodiversité (OFB)
- **Jérôme MOUSSET**, Agence de la transition écologique (ADEME)

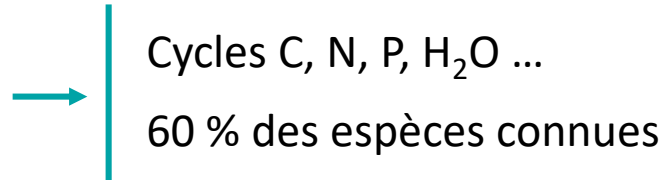


## ➤ Contexte et modalités de réalisation de l'étude

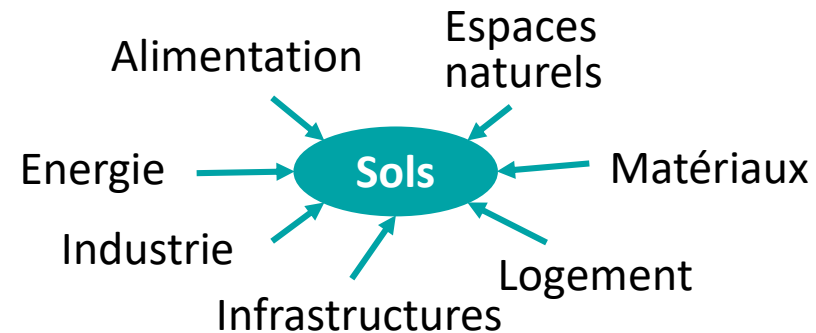
Sophie Leenhardt, INRAE-DEPE

# ➤ Montée en puissance des préoccupations sur la qualité des sols

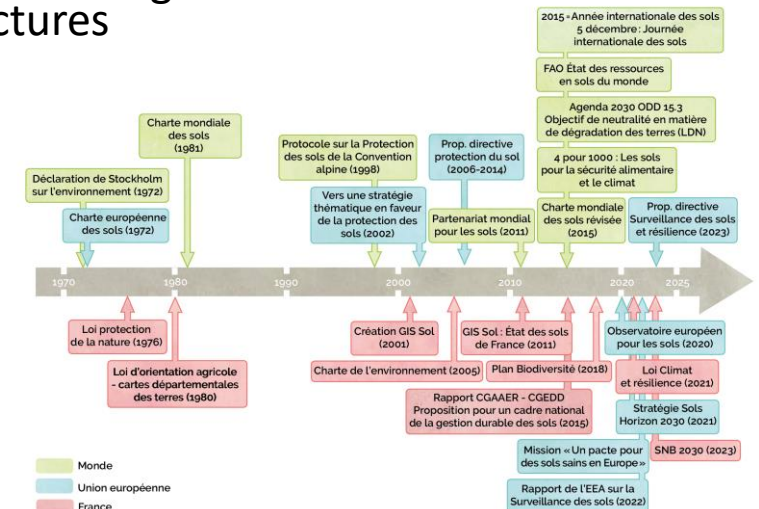
Prise de conscience de l'importance du rôle des sols



Intensification de la concurrence entre utilisations



➔ Multiplication des initiatives



INRAE

Etude DEPE – Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs

20 novembre 2024 / Colloque de restitution

## ➤ Au démarrage de l'étude

### Initiatives existantes

- Des programmes de recherche, guides, outils
- Question irrésolue de l'opérationnalité
- Développement de propositions commerciales

### Contexte politique

- Abordée en silo dans les différents domaines juridiques (rural, urbanisme, environnement, forêt, énergie, etc.)
- Deux instruments intégrateurs en émergence
  - Loi Climat et résilience de 2021 – sobriété foncière
  - UE proposition Directive cadre 2023 - « *Soil monitoring and resilience* »
- A la recherche d'un diagnostic : propositions de lois Bonnefoy (2023), Ramos (2023), projet de loi d'orientation agricole (2024)

## ➤ Ressources scientifiques disponibles ?





## ➤ Cadre général des études DEPE

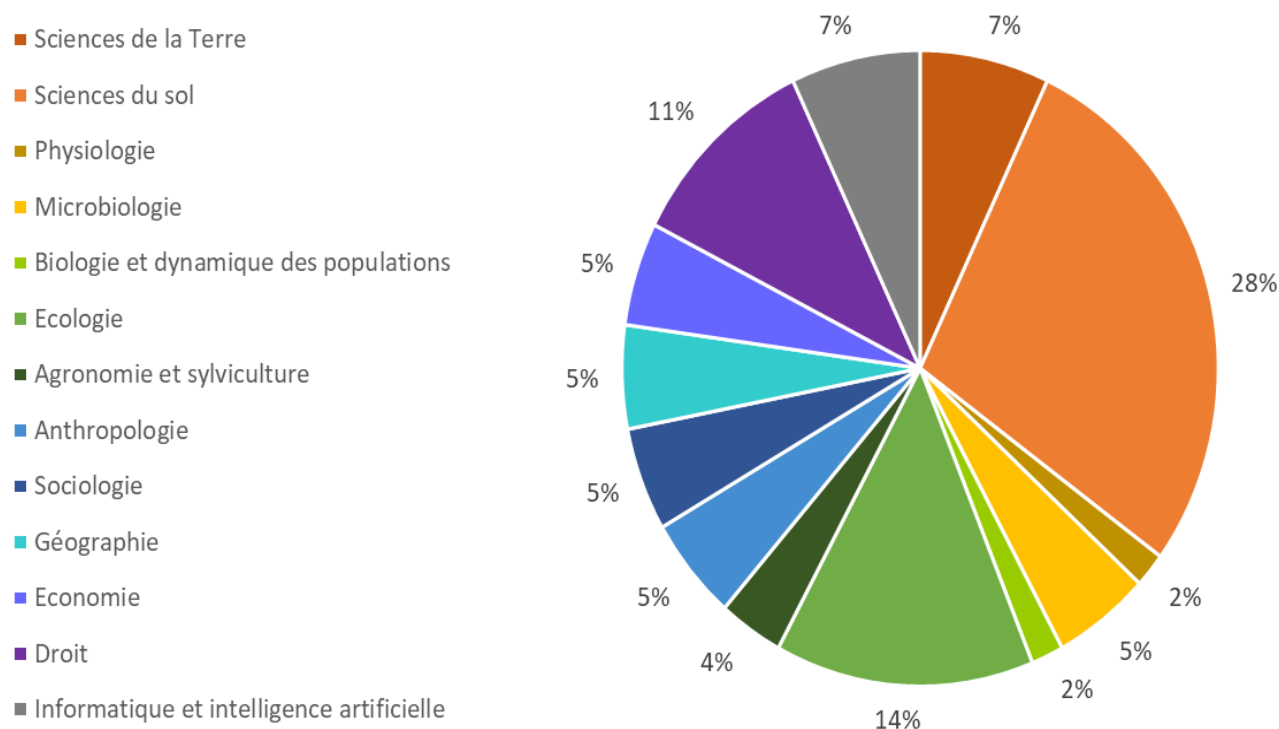
- Etat des lieux des **connaissances scientifiques**
- Sur un sujet nécessitant une approche **pluridisciplinaire**
- A la demande d'un **acteur public**
- En interaction avec un **Comité consultatif d'acteurs**
- Pour éclairer une action **sans formuler de recommandation**



[https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/DEPE\\_Principes\\_Conduite\\_ESCo\\_Etudes\\_V2\\_20211110.pdf](https://www.inrae.fr/sites/default/files/pdf/DEPE_Principes_Conduite_ESCo_Etudes_V2_20211110.pdf)

## ➤ Mise en œuvre

- **Comité d'experts scientifiques**
  - 19 experts dont 2 pilotes scientifiques
  - 10 organismes de recherche



Domaines disciplinaires des experts de l'étude

## • Collectif de travail

### Pilotes scientifiques

Isabelle COUSIN  
Maylis DESROUSSEAUX

### Experts scientifiques

Denis ANGERS  
Laurent AUGUSTO  
Jean-Sauveur AY  
Adrien BAYSSE-LAINÉ  
Philippe BRANCHU  
Alain BRAUMAN  
Nicolas CHEMIDLIN PRÉVOST BOURÉ  
Claude COMPAGNONE  
Raphaël GROS  
Carole HERMON  
Catherine KELLER  
Germain MEULEMANS  
David MONTAGNE  
Guénola PÉRÈS  
Nicolas SABY  
Jean VILLERD  
Cyrille VIOLLE

### Experts scientifiques - contributeurs ponctuels

Bertrand LAROCHE  
Emmanuelle VAUDOUR

### Conduite de projet

Sophie LEENHARDT - *Coordination, rédaction* ; Claire MEUNIER - *Appui à la coordination*.

Sybille de MARESCHAL, Virginie LELIEVRE - *Gestion bibliographique*.

Marie-Caroline BRICHLER, Claire FROGER, Julie ITEY - *Chargées de mission*.

Kim GIRARD - *Appui communication et gestion administrative* ; Sandrine GOBET - *Gestion logistique et administrative*.

Isabelle SAVINI - *Design éditorial*.

Sacha DESBOURDES - *Design graphique*.

Maëlle JOLY - *Illustration*.



## ➤ Cadrage initial de l'étude

### Focale sur :

- Un positionnement **générique** pour l'ensemble des usages
- Les **fonctions écologiques** en lien avec la loi Climat et résilience
- Une liste des **principaux indicateurs**
- La **démarche d'évaluation** et les choix pour l'utilisateur

### Pas de recueil spécifique de la littérature portant sur :

- **Sites et sols pollués** : réglementation spécifique, dichotomie de la littérature scientifique, proportion réduite du territoire.
- **Outre-mer** : corpus basé sur la littérature internationale, valeurs applicables aux zones tempérées.
- **Impacts des pratiques et usages** agricoles, forestiers, urbains.

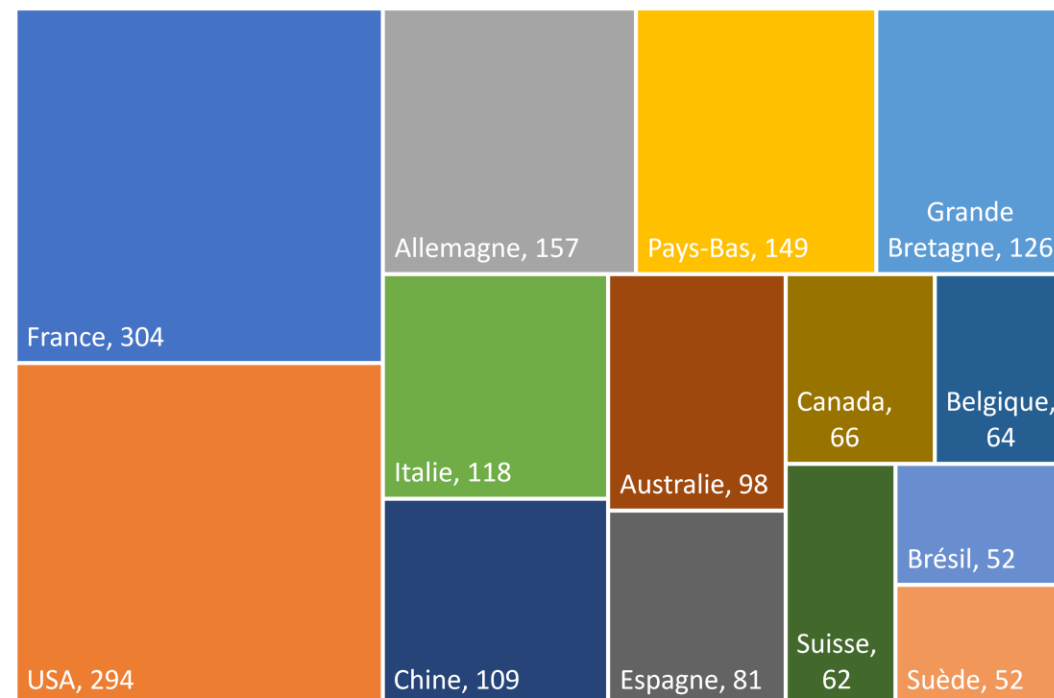


## > Sources

Corpus bibliographique :  
**1 800 références citées**

- ✓ dont 1 500 articles revus par les pairs  
**260 revues de littérature**
- ✓ Place relativement importante de la littérature grise (ouvrages, rapports ...)
- ✓ Majoritairement axé sur les contextes agricoles

*Principaux pays d'affiliation des auteurs - ref/pays > 50  
(1 277 références analysables dans le Web of Science)*



## > Livrables



### Rapport

1 000 pages

Contexte et cadrage

Sources bibliographiques

### Synthèses thématiques

**Définir** la qualité des sols

**Mesurer** la qualité des sols

**Prendre en compte** la  
qualité des sols

Conclusions générales

### Synthèse

100 pages

### Résumé

10 pages

**INRAE**

Etude DEPE – *Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs*

20 novembre 2024 / Colloque de restitution



ÉCOLE  
D'URBANISME  
DE  
PARIS

UNIVERSITÉ PARIS-EST CRÉTEIL  
UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL

INRAE

L'INSTITUT  
agro  
Rennes  
Angers

 Cerema  
CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

 Institut de Recherche  
pour le Développement  
FRANCE



cnrs

amU  
Aix Marseille Université

UNIVERSITÉ  
TOULOUSE  
CAPITOLE  


L'INSTITUT  
agro  
Dijon

cnrs

SCIENCES HUMAINES  
& SOCIALES



Agriculture et  
Agroalimentaire Canada

Agriculture and  
Agri-Food Canada

AgroParisTech 

INRAE

Etude DEPE – Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs  
20 novembre 2024 / Colloque de restitution

INRAE

➤ Intérêt des indicateurs pour la préservation des sols

Maylis Desrousseaux, Ecole d'urbanisme de Paris

# ➤ Le rôle des indicateurs dans la préservation de la qualité des milieux

## Objectiver la qualité

- La notion de qualité a évolué d'une approche purement anthropocentrée vers la prise en compte des critères écologiques de la qualité des milieux



- Les indicateurs sont un mécanisme classique du **droit de l'environnement**
  - Lui vaut son qualificatif de droit « **technique** »
  - Sert au contrôle et à la prévention de la dégradation des milieux
  - Traduit une **immixtion des connaissances scientifiques** dans un système juridique
  - Evolue parallèlement : la maturation de concepts et de méthodes ne doit pas être un frein à l'évolution du cadre juridique



## ➤ Artificialiser c'est dégrader

Art. L. 101-2-1 du Code de l'urbanisme

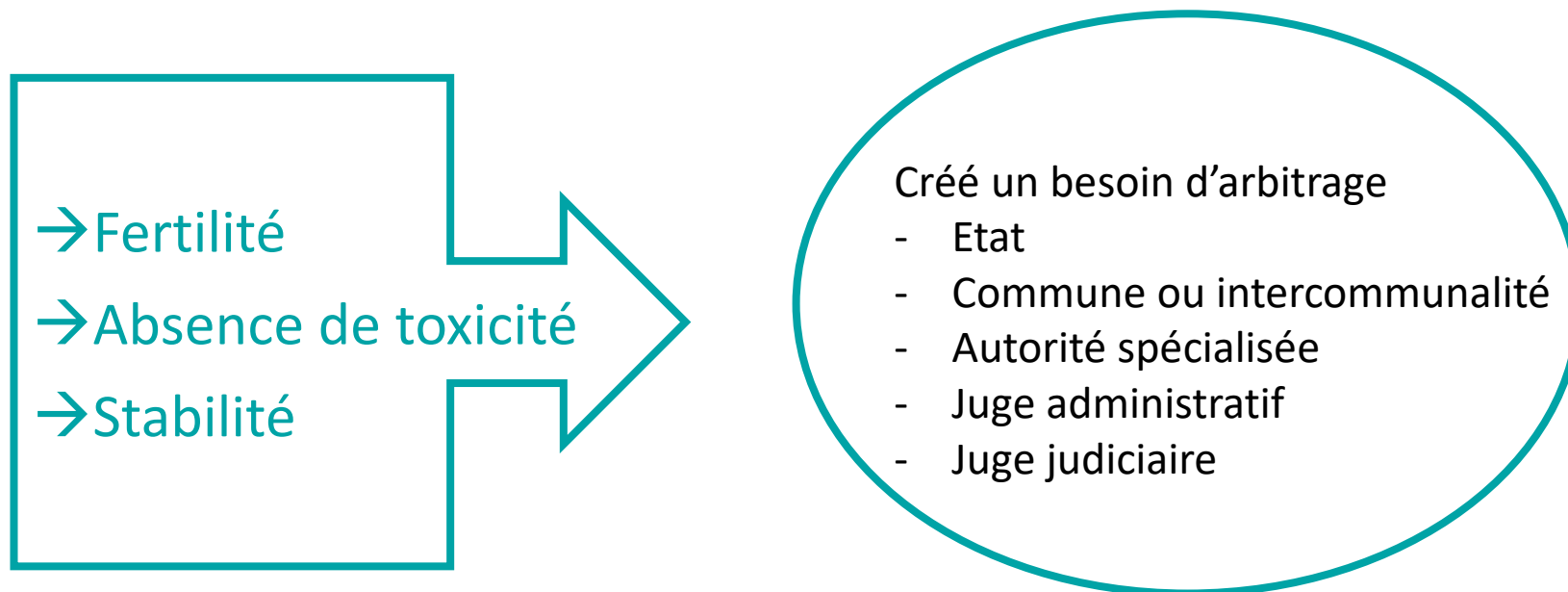
L'artificialisation est définie comme l'altération durable de tout ou partie des fonctions écologiques d'un sol, en particulier de ses fonctions biologiques, hydriques et climatiques, ainsi que de son potentiel agronomique par son occupation ou son usage.

- > Comment qualifier l'altération durable ? Implique la nécessité de préserver les sols de cette altération
- > La loi Climat et résilience marque une étape fondamentale dans « l'écologisation » du droit de l'urbanisme
- > Souligne le besoin de doter les territoires d'un système d'indicateurs guidant les arbitrages d'affectation et d'occupation du sol

## ➤ Un enjeu d'uniformisation

Diversité des perceptions et de la gestion de la qualité des sols

Recherche d'une qualité d'usage



INRAE

➤ La qualité des sols dans l'aménagement

Adrien Baysse-Lainé, CNRS-UMR Pacte



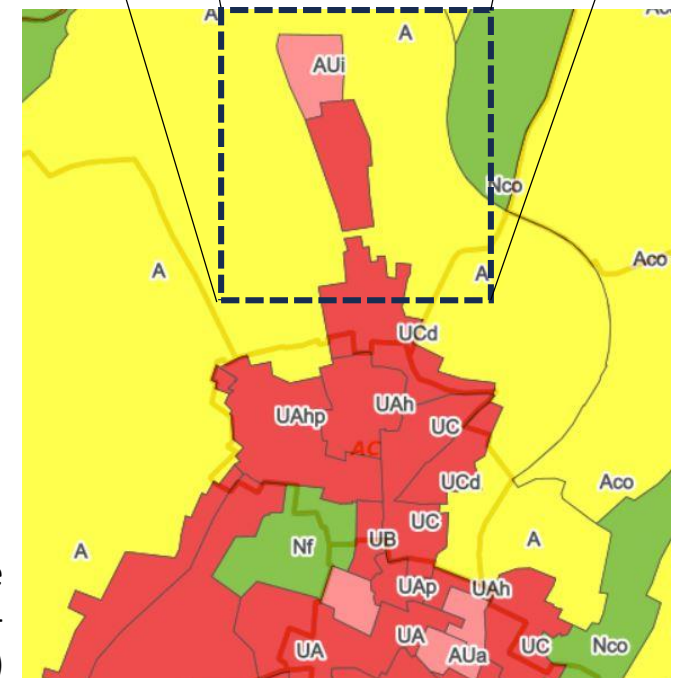
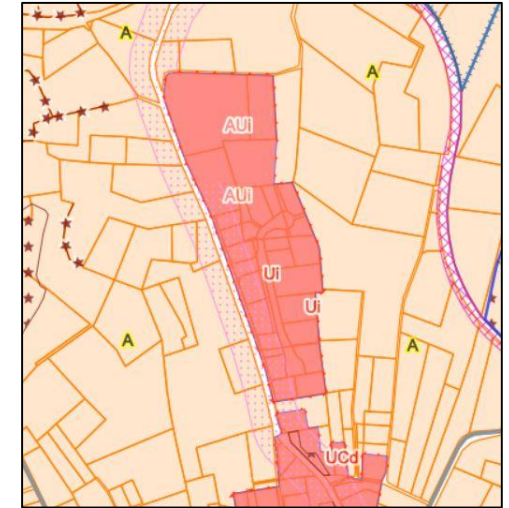
## ➤ Des raisonnements centrés sur le foncier plus que sur les sols

Dans la planification urbaine, les classements sont d'abord fonciers, ce qui invisibilise la qualité des sols

Principes 1/ de sectorisation à l'échelle **parcellaire** et 2/ d'urbanisation en **continuité** du tissu existant → marginalisation des critères pédologiques.

Notion de « **potentiel agronomique**, biologique et économique » (article R.151-22 du Code l'urbanisme), sous-utilisée dans les pratiques de zonage.

**Intégration des valeurs** foncières et pédologiques par le coefficient de constructibilité potentielle (Boutet et Serrano, 2013) restée lettre morte.



Source : Géoportail de l'urbanisme (Soucieu-en-Jarrest, Rhône)

## ➤ Des raisonnements centrés sur le foncier plus que sur les sols

Le contrôle juridictionnel des PLU manque d'un référentiel, laissant les juges arbitres du potentiel agronomique

Analyse du contentieux : libre interprétation de la « valeur agronomique » selon les arguments et rapports d'expertises des parties → appréciation au **cas par cas** + qualité rarement déterminante dans le zonage 'agricole' vs. 'à urbaniser'.

Disparités territoriales << manque de critères objectifs, de cohérence nationale. Introduction d'un **volet qualité des sols** dans les **SCoT** pour appuyer les PLU(i) ?

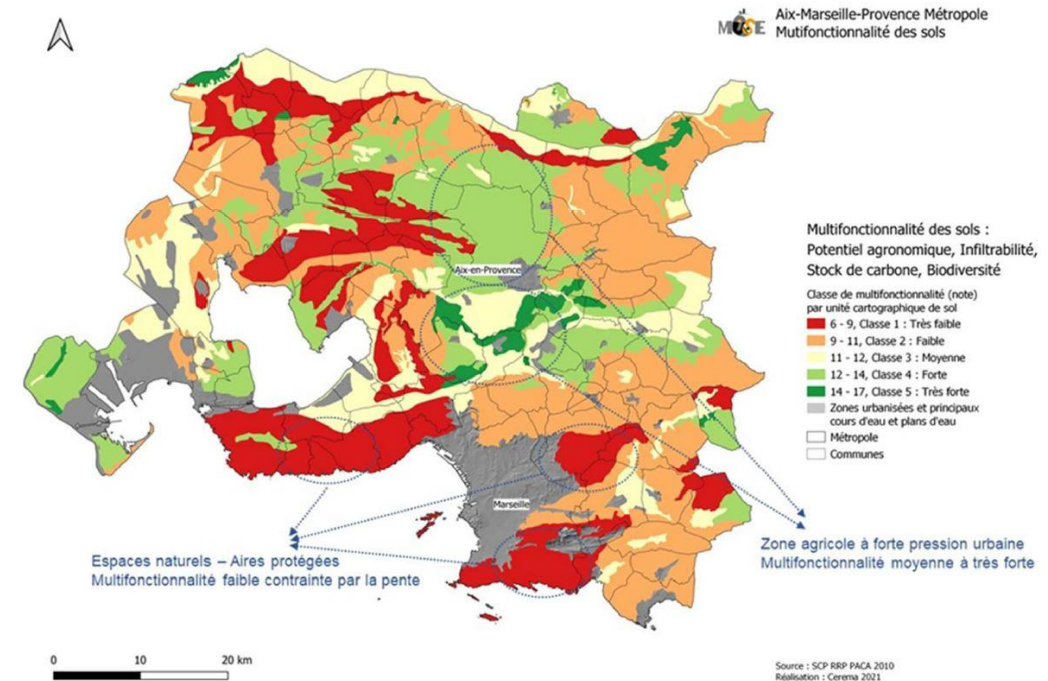
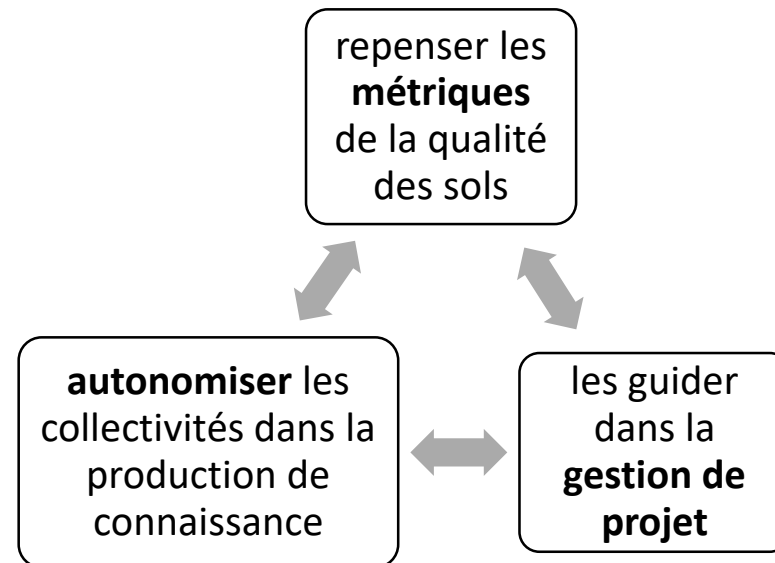


# ➤ L'essor d'initiatives locales pour une approche par les fonctions

Des tentatives d'outils d'aide à la décision pour les acteurs de la planification

Cartes de la qualité des terres et des sols disponibles en appui au zonage, sans réel impact → **information # connaissance** (biais dans le changement d'échelle)

Essor d'outils d'aide à la décision :



Source : rapport du projet MUSE, Cerema



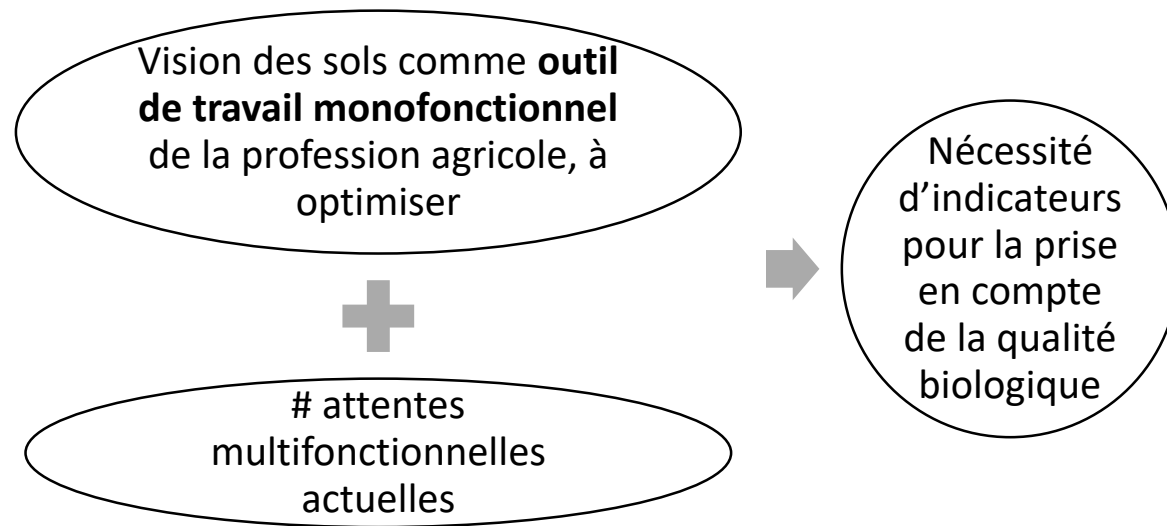




# ➤ En agriculture, la qualité des sols est plus prise en compte, mais de manière partielle

Délimitation de **terroirs** : AOC-AOP.

**Hiérarchisation** des terres : aménagements fonciers, fermage.



## b) Qualité du sol en BRESSE

1er groupe : 55 à 70 points

- Terres fertiles, généralement argilo-limoneuses, profondes, saines, en légère pente.

2è groupe : 35 à 54 points

- Limons battants de plateaux assainissables, sans difficultés particulières
- Terrains du 1er groupe mais avec des sources et mouillères.
- Terres argileuses de bas fonds, inondables.
- Terres avec graviers ou sableuses, profondes, peu sensibles à la sécheresse.

3è groupe : 15 à 34 points

- Terres de graviers ou sableuses, sensibles à la sécheresse.
- Terrains limoneux, difficiles à assainir.

4è groupe : 8 à 14 points

- Terres inondables, généralement argileuses.
- Terrains caillouteux ou sableux, très sensibles au sec.
- Terrains dont la pente interdit tous travaux mécaniques.

Source : arrêté préfectoral d'encadrement du fermage dans le département de l'Ain (1978)

INRAE

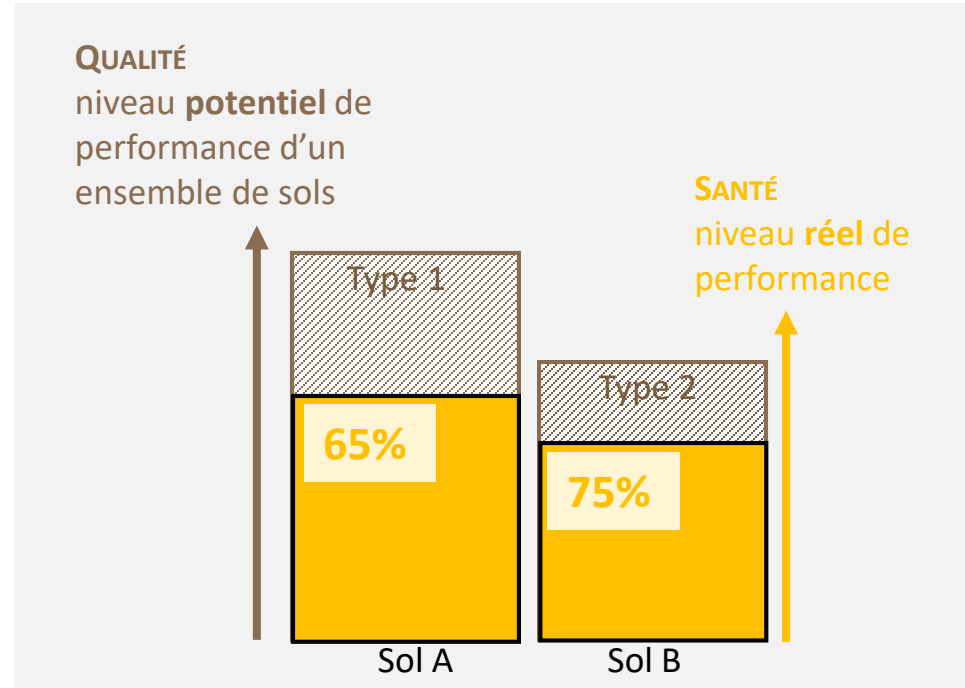
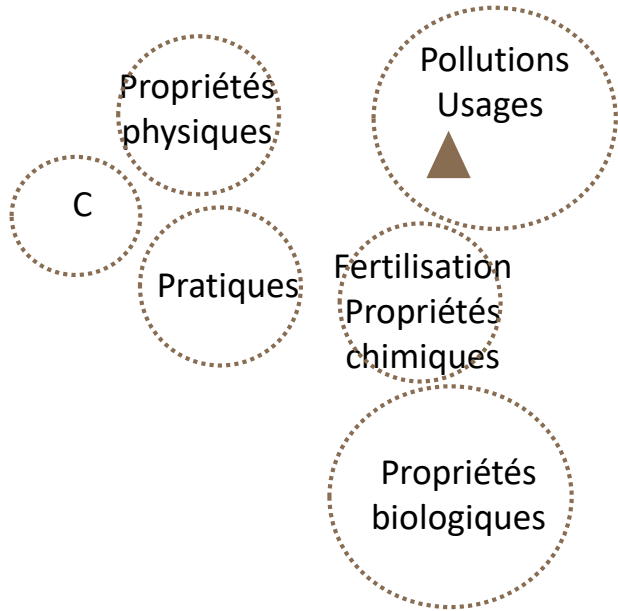
➤ Vers un langage commun

Isabelle Cousin, INRAE-Info&Sols

# > (co-)définir la Qualité et/ou la Santé des sols

## Qualité des sols

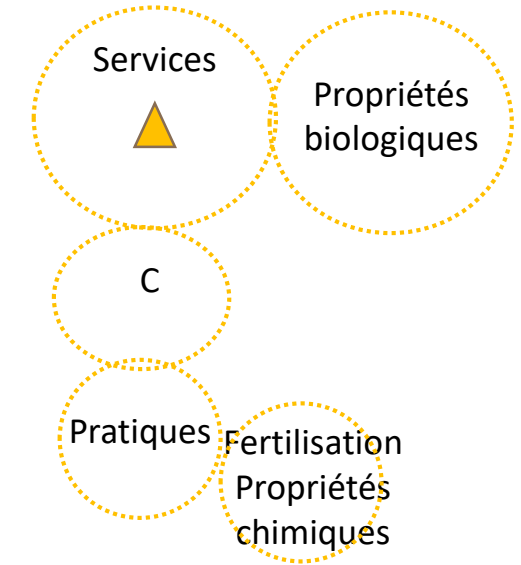
- ▶ « Ce que le sol est »
- ▶ « Capacité des sols à assurer des fonctions »
- ▶ « Capacité d'un **type spécifique de sol** à fonctionner dans les limites d'un écosystème **naturel ou géré**, pour soutenir la productivité des plantes et des animaux, maintenir ou améliorer la qualité de l'eau et de l'air, et protéger la santé humaine » (Karlen *et al.*, 1997)



☛ Nécessité d'une **co-définition** des concepts, en lien avec leur appropriation différenciée par les **acteurs**

## Santé des sols

- ▶ (évolution légère de la proposition de Karlen *et al.*, 1997)
- ▶ « capacité continue des sols à soutenir les services écosystémiques »
- ▶ concept plus polysémique / concept « vague »



## Santé des sols

- ▶ « Bonne » santé

## Qualité

- ▶ Manière d'être (d'une chose) qui lui donne une valeur plus ou moins grande

INRAE

Etude DEPE – Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs

20 novembre 2024 / Colloque de restitution

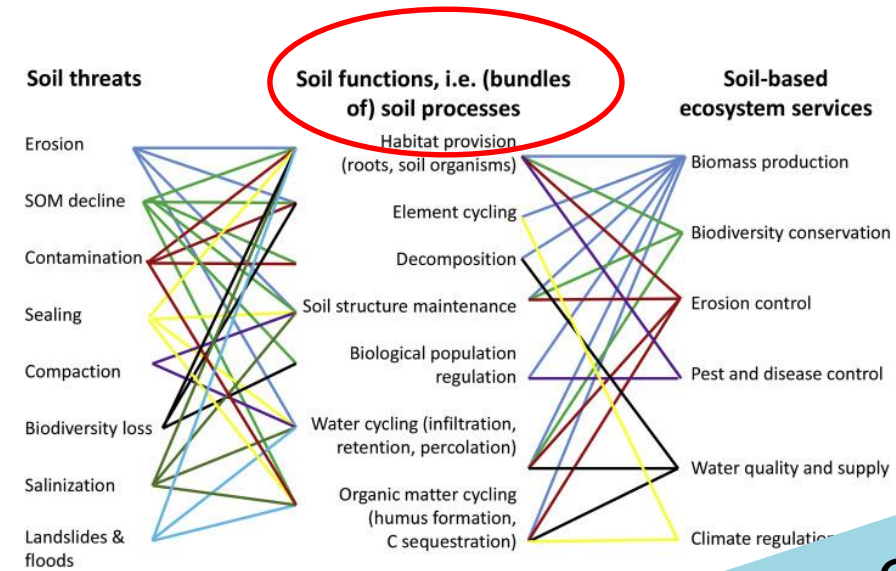
# INRAE

## ➤ Six fonctions des sols

Denis Angers, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec



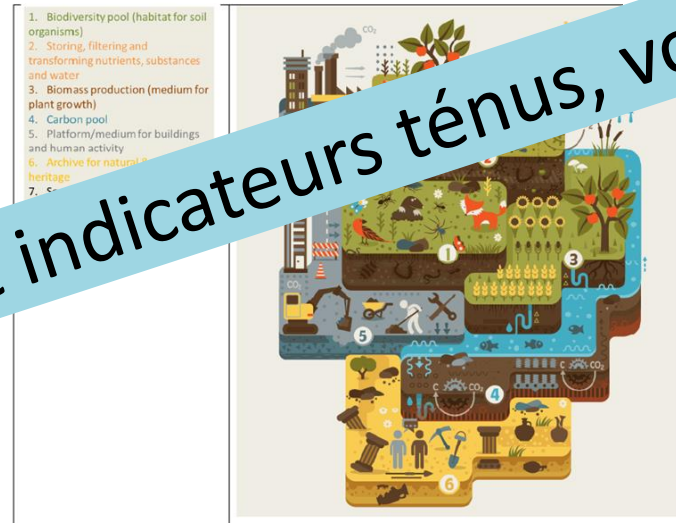
# ➤ Quelques propositions de listes de fonctions des sols



Bunemann *et al.*, 2018

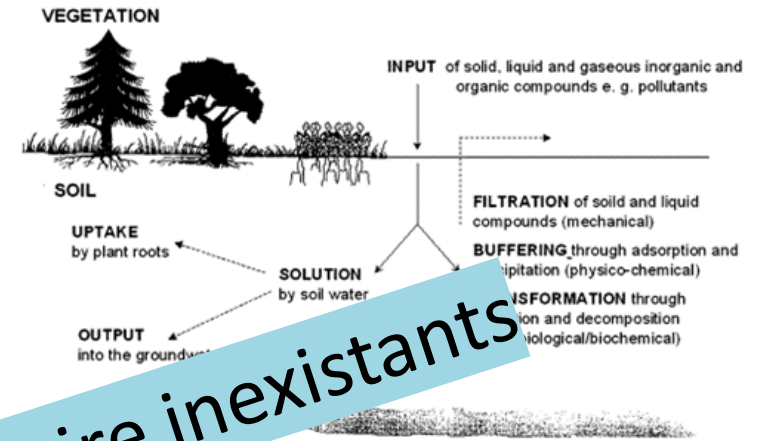
Liens entre fonctions et indicateurs ténus, voire inexistant

Figure 1.1 Soil as an integrated element of land and ecosystems



Source: CircUse, 2013

Gregor *et al.*, 2018



Blum 2005

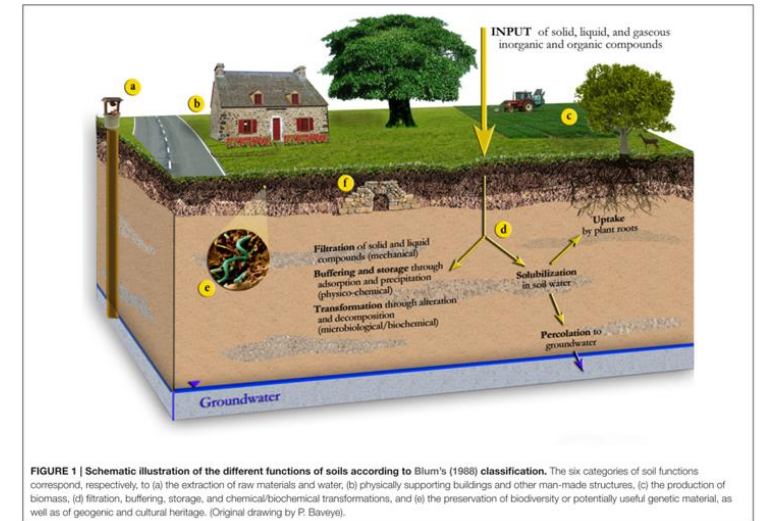


FIGURE 1 | Schematic illustration of the different functions of soils according to Blum's (1988) classification. The six categories of soil functions correspond, respectively, to (a) the extraction of raw materials and water, (b) physically supporting buildings and other man-made structures, (c) the production of biomass, (d) filtration, buffering, storage, and chemical/biochemical transformations, and (e) the preservation of biodiversity or potentially useful genetic material, as well as of geogenic and cultural heritage. (Original drawing by P. Baveye).

Baveye *et al.*, 2016



## ➤ Une fonction du sol : une action sur un objet

Sur cette base nous proposons de définir **la fonction des sols comme une action du sol sur un objet**, qu'il soit composant du sol ou non.

Le choix final des fonctions s'appuie ainsi sur les **couples actions-objets les plus communs**

- Volonté de rester sur la dimension « écologique » des fonctions
- Préoccupation de laisser de la place à l'action du sol sur lui-même (maintenance...)

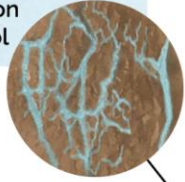
Une fonction est un **assemblage de processus** (*bundle of processes*, Bunemann *et al.*, 2018).



# ➤ Les six fonctions des sols

**Réguler l'eau en quantité et en qualité**

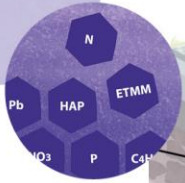
- Infiltrer, stocker et transférer l'eau
- Réguler la composition de l'eau quittant le sol



- B** Eau de la biomasse
- ET** Évapotranspiration
- I** Infiltration
- N** Nappe
- Per** Percolation
- P** Précipitations
- RC** Remontée capillaire
- RE** Réserve en eau
- R** Ruissellement

**Réguler les contaminants**

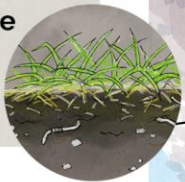
- Retenir des contaminants
- Diminuer la biodisponibilité des contaminants
- Dégrader les contaminants



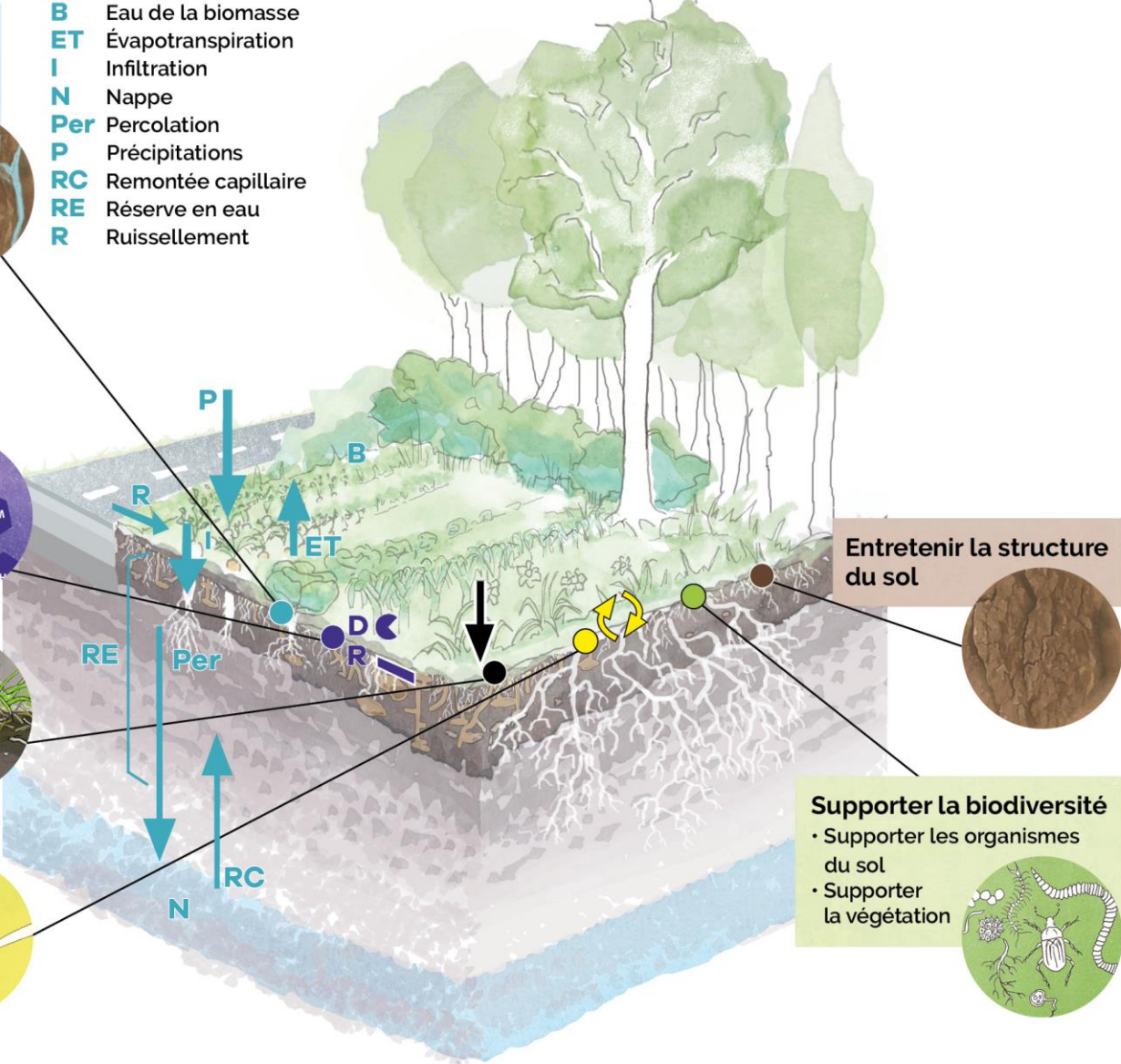
- D** Dégradation
- R** Rétention

**Stocker du carbone**

- Réservoir
- Stockage additionnel



**Fournir des nutriments à la biocénose**



**Entretien de la structure du sol**



**Supporter la biodiversité**

- Supporter les organismes du sol
- Supporter la végétation



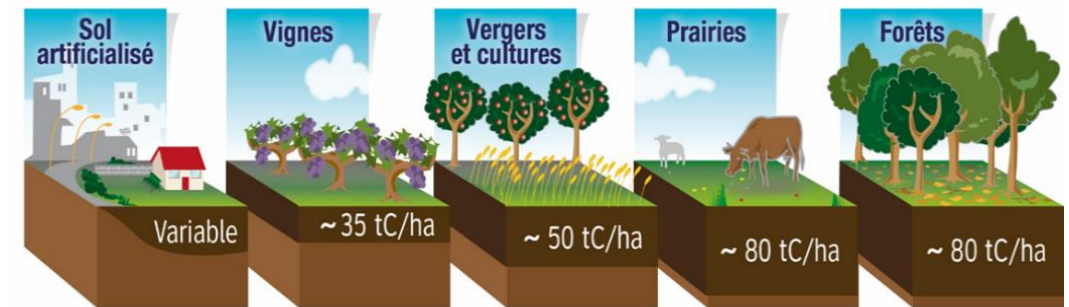
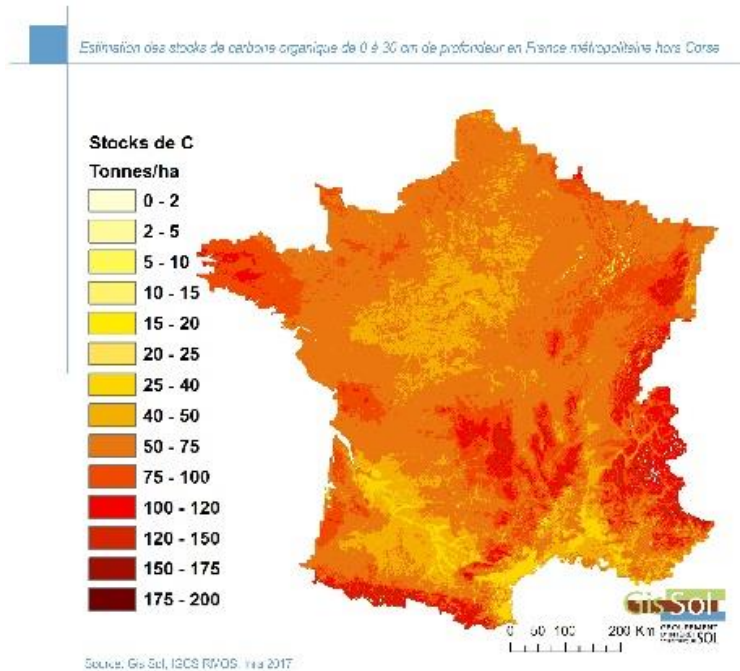
Nombreuses et fortes **interactions** entre les fonctions



## ➤ Évaluer la réalisation des fonctions...

On peut évaluer des **stocks** (quantité, abondance) ou des **flux**

### Exemple du **C organique**



XX Estimation du stock de carbone dans les 30 premiers centimètres du sol

Stocks de **C organique** dans les 30 premiers centimètres selon le mode d'occupation des sols (Ademe 2014)

Carte des **stocks de C organique** contenu dans les sols (0-30 cm) (Martin 2019)

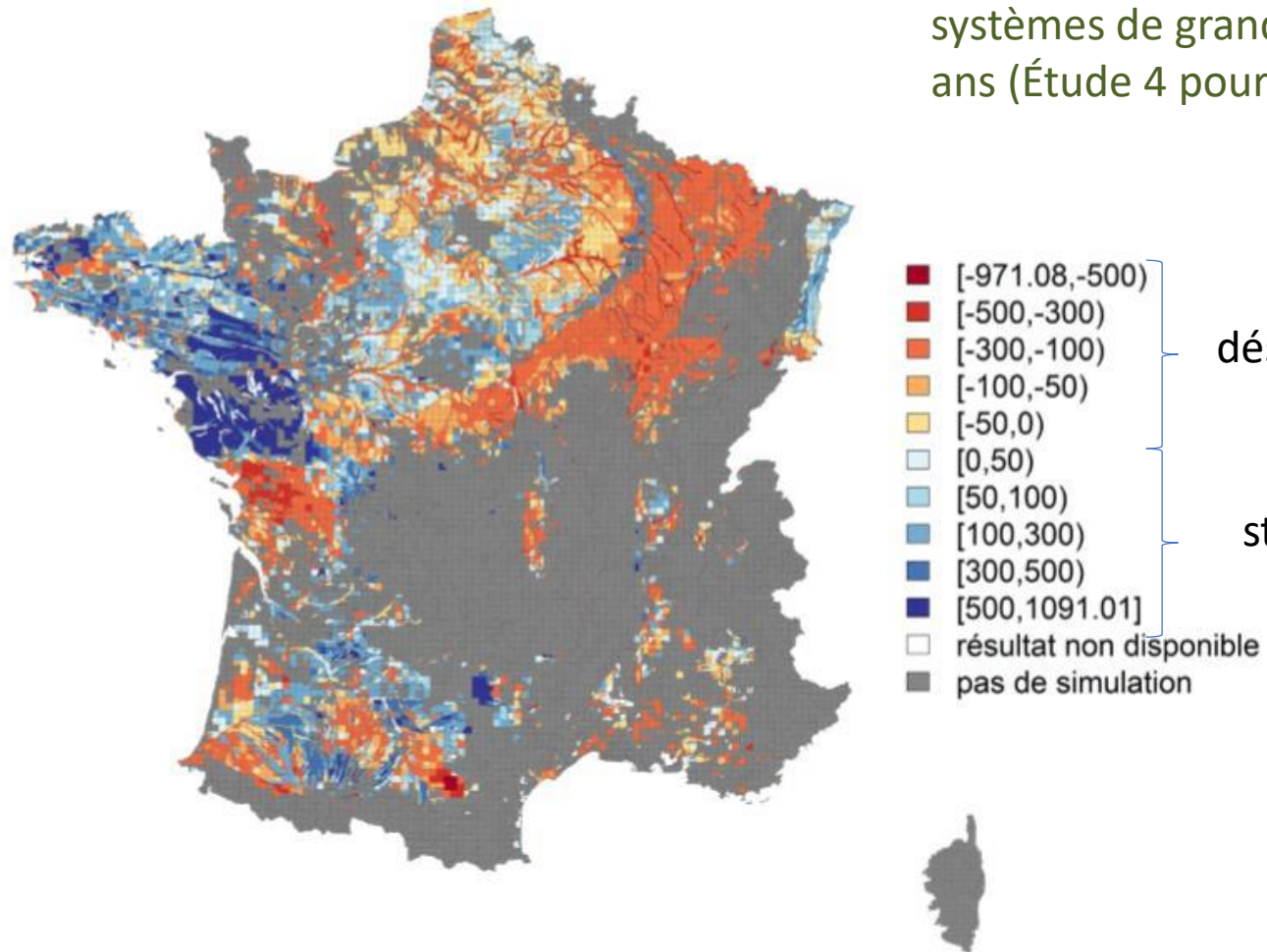
**INRAE**

Etude DEPE – Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs

20 novembre 2024 / Colloque de restitution

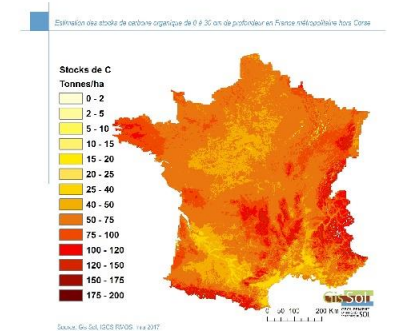
## ➤ On peut évaluer des flux

Stockage de carbone annuel (**kgC/ha/an**) sur l'horizon 0-30 cm pour les systèmes de grandes cultures et prairies temporaires actuels simulés sur 30 ans (Étude 4 pour 1000, Pellerin *et al.*, 2020)



## Mesure directe...

RMQS-1

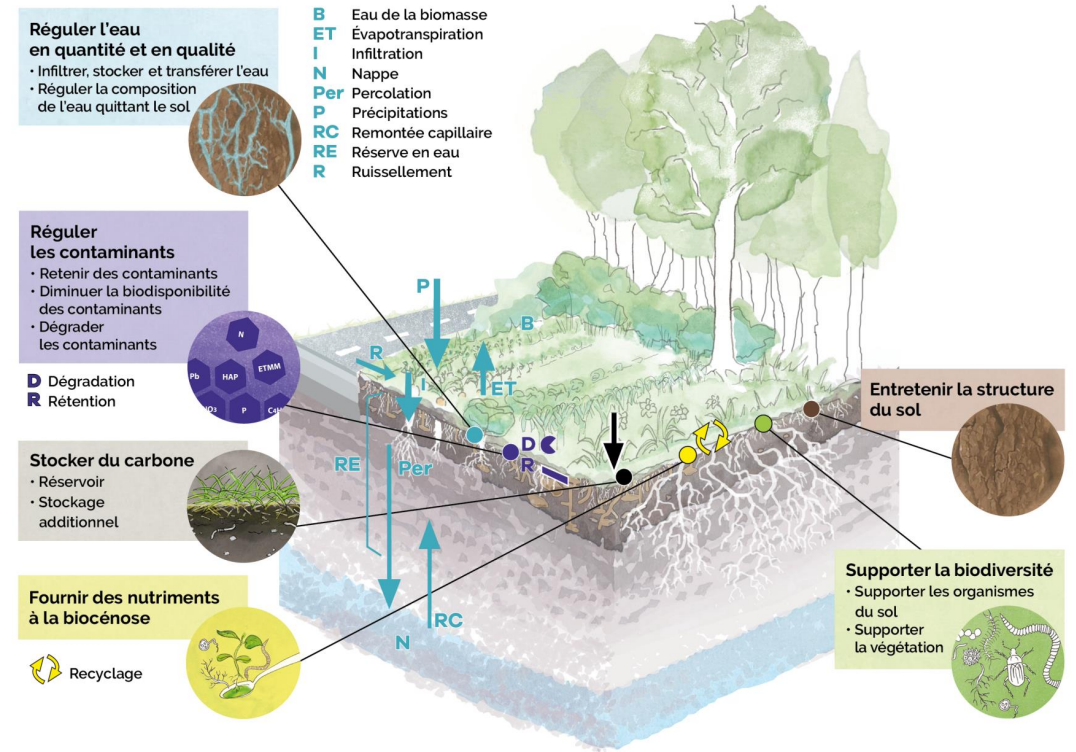


RMQS-2



## ➤ Pour conclure :

- Nous retenons **six fonctions** (écologiques) des sols...
- une action sur un objet (pouvant être le sol lui-même)



- Une fonction est un **assemblage de processus** (*bundle of processes*, Bunemann *et al.*, 2018).
- La mesure de réalisation d'une fonction peut être **un stock ou un flux**.

# INRAE

## ➤ Construire un système d'indication en appui aux politiques environnementales

David Montagne, AgroParisTech - ECOSYS

Isabelle Cousin, INRAE - Info&Sols

Guénola Pérès, Institut Agro - SAS

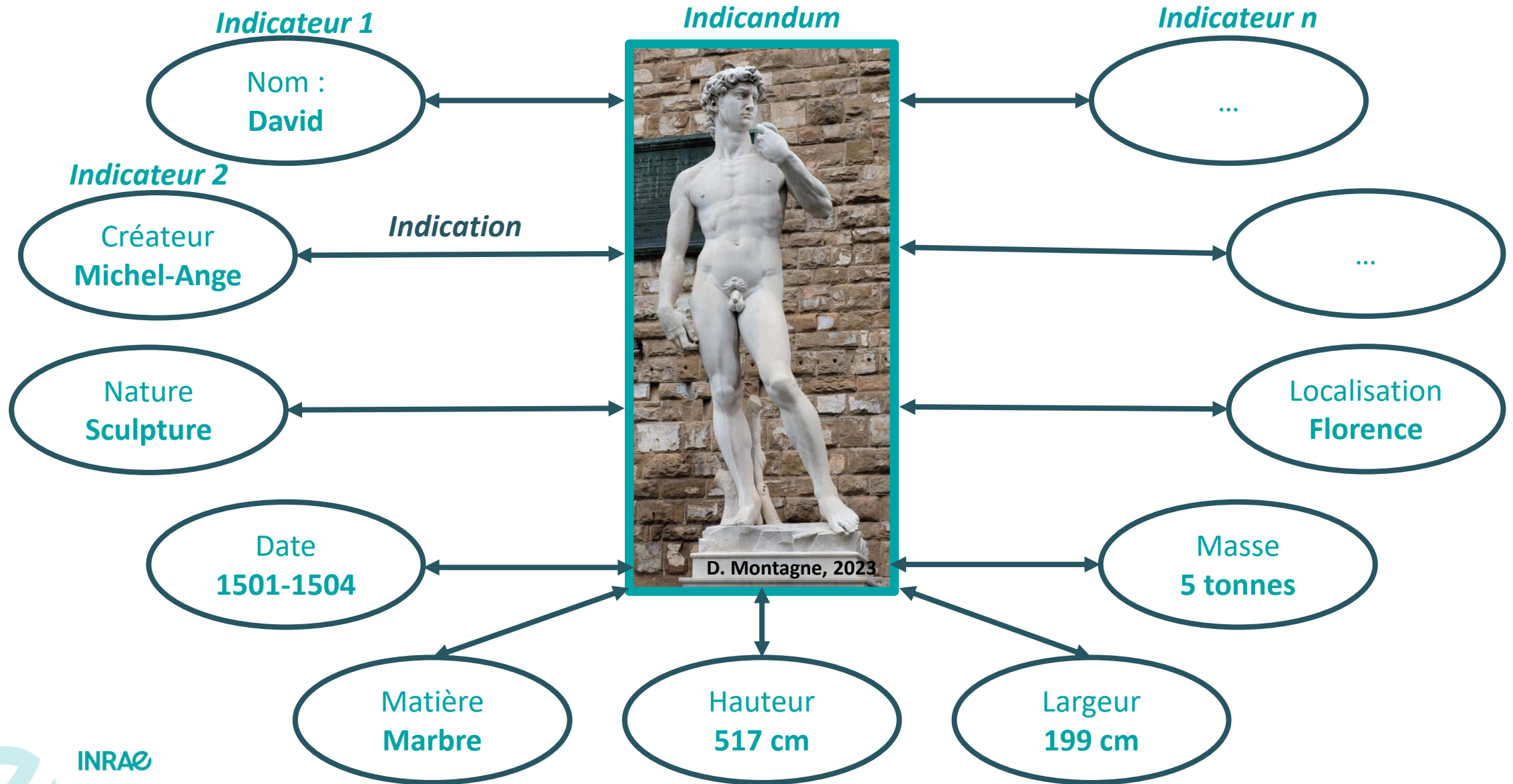


## ➤ Qu'est-ce qu'un indicateur

David Montagne, AgroParisTech



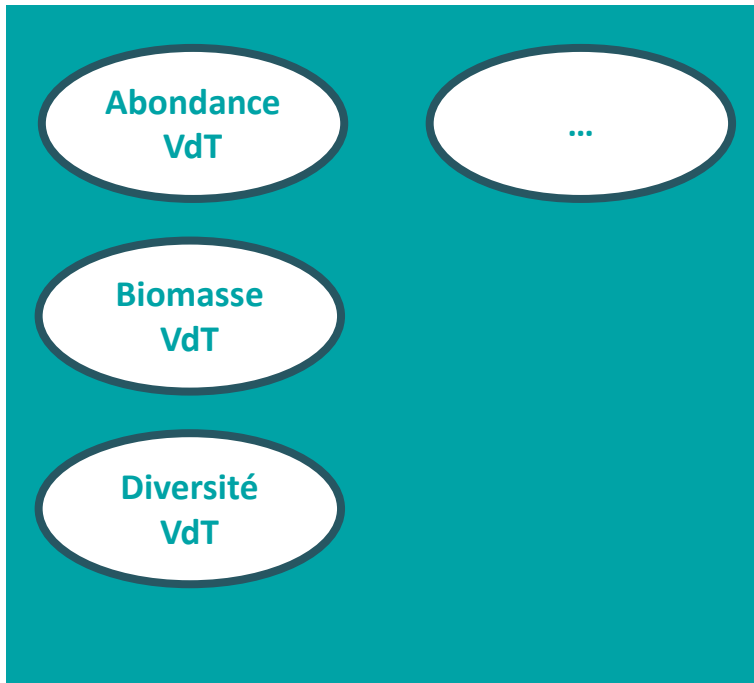
# ➤ Indication, *indicandum* et indicateurs



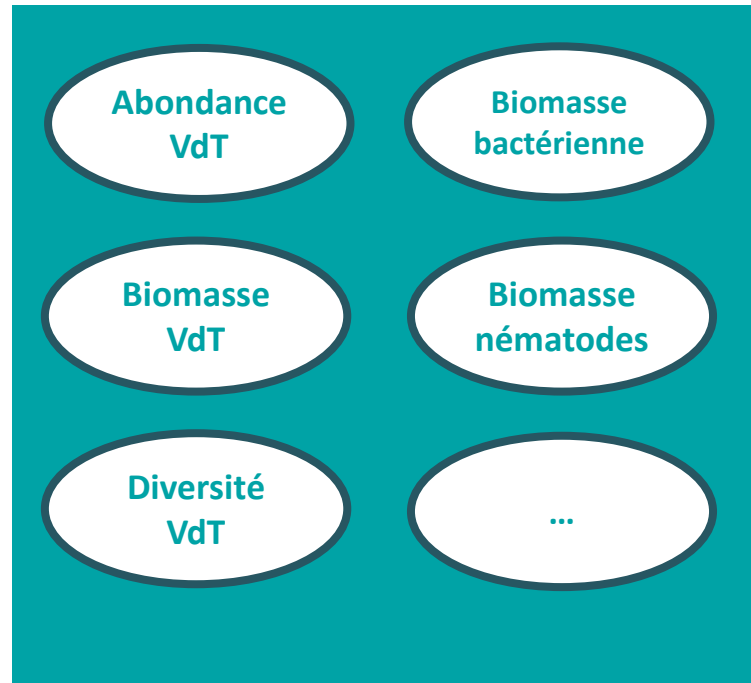
# ➤ Quel *indicandum* pour un système d'indication sur les sols ?

## Complexité de l'indicandum

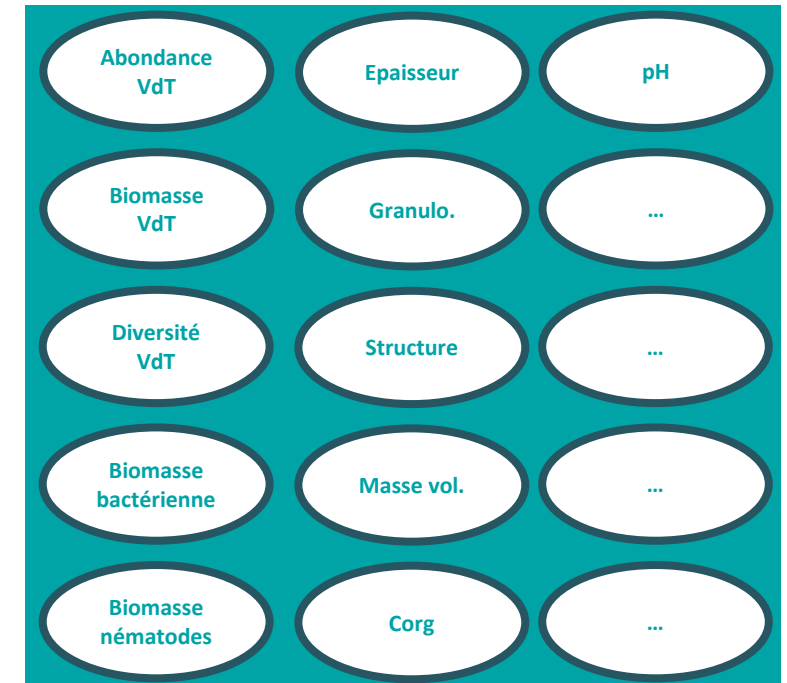
### Communauté de vers de terre



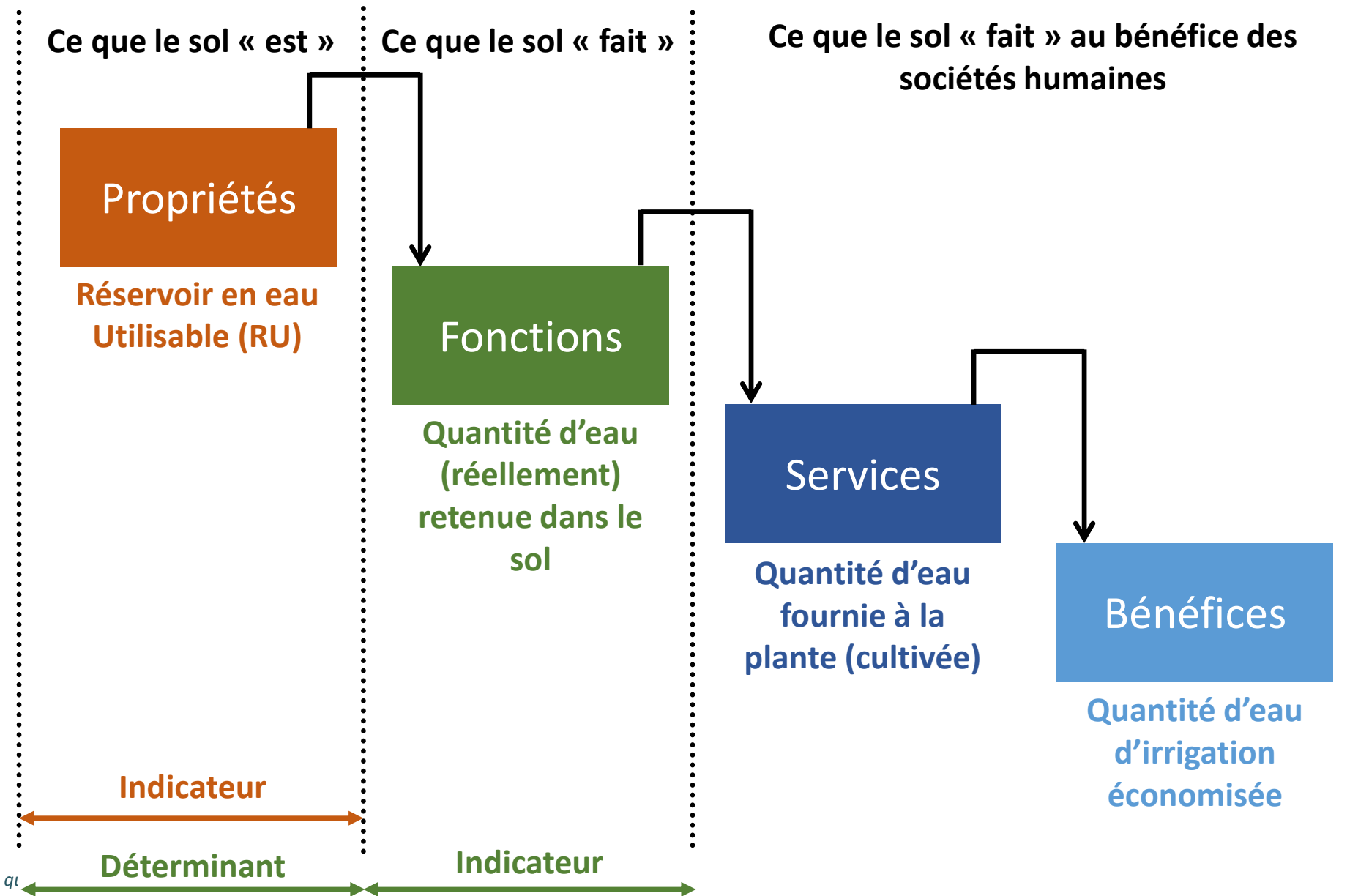
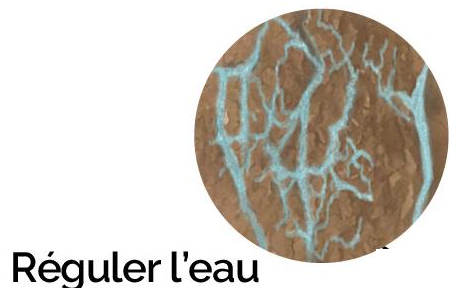
### Biodiversité des sols



### Qualité/Santé des sols

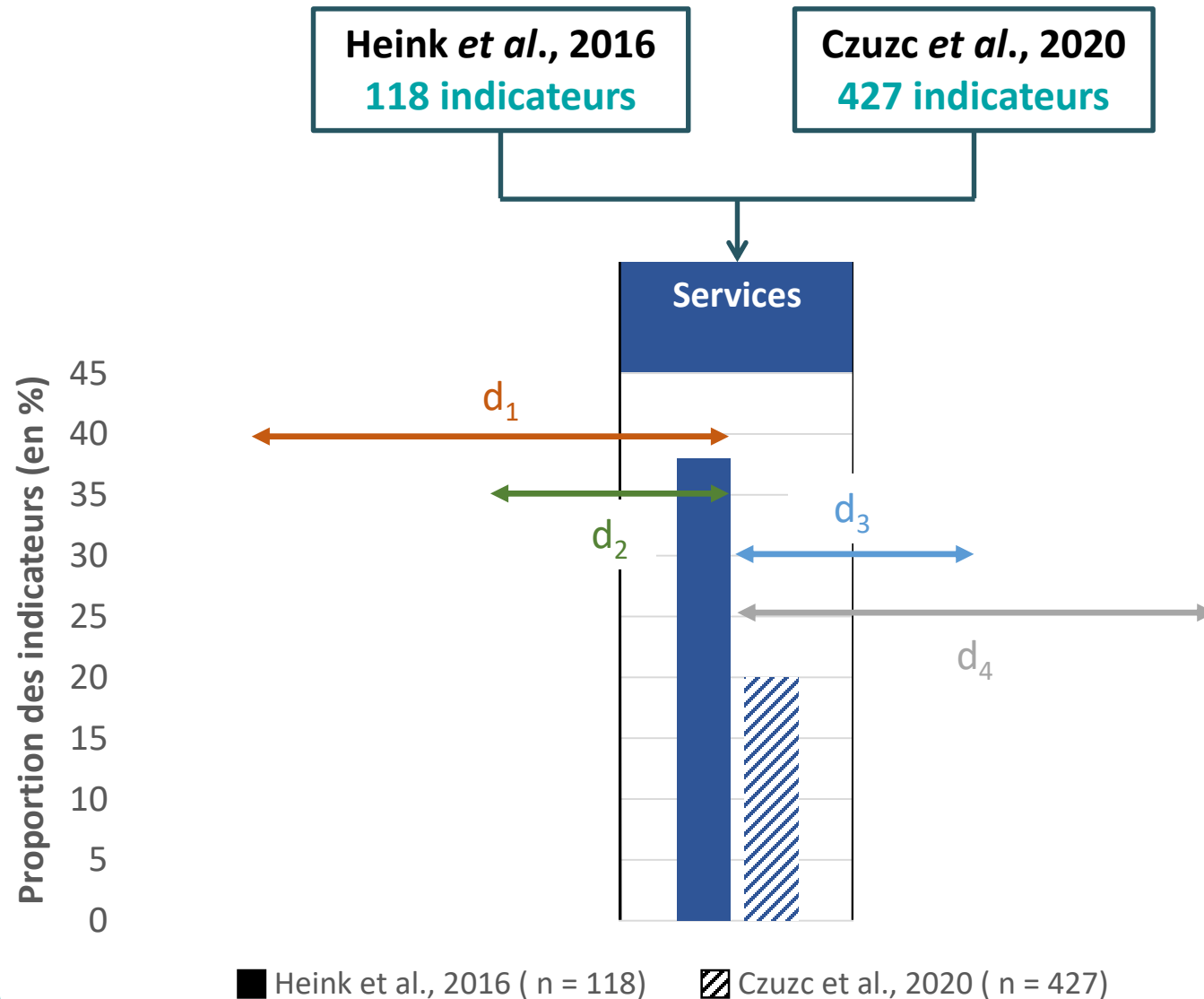


# ➤ La sélection des indicateurs : le cadre du modèle en cascade





## ➤ La sélection des indicateurs : la théorie face à la pratique

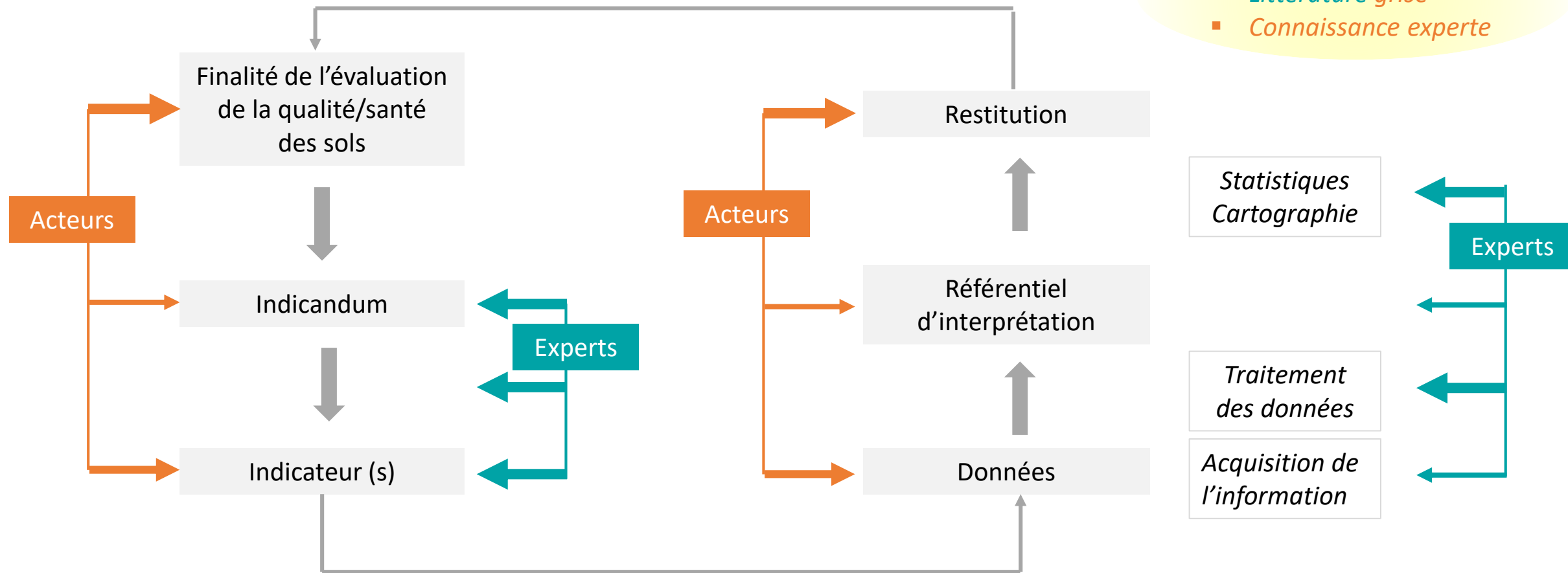


## ➤ Construire un système d'indication

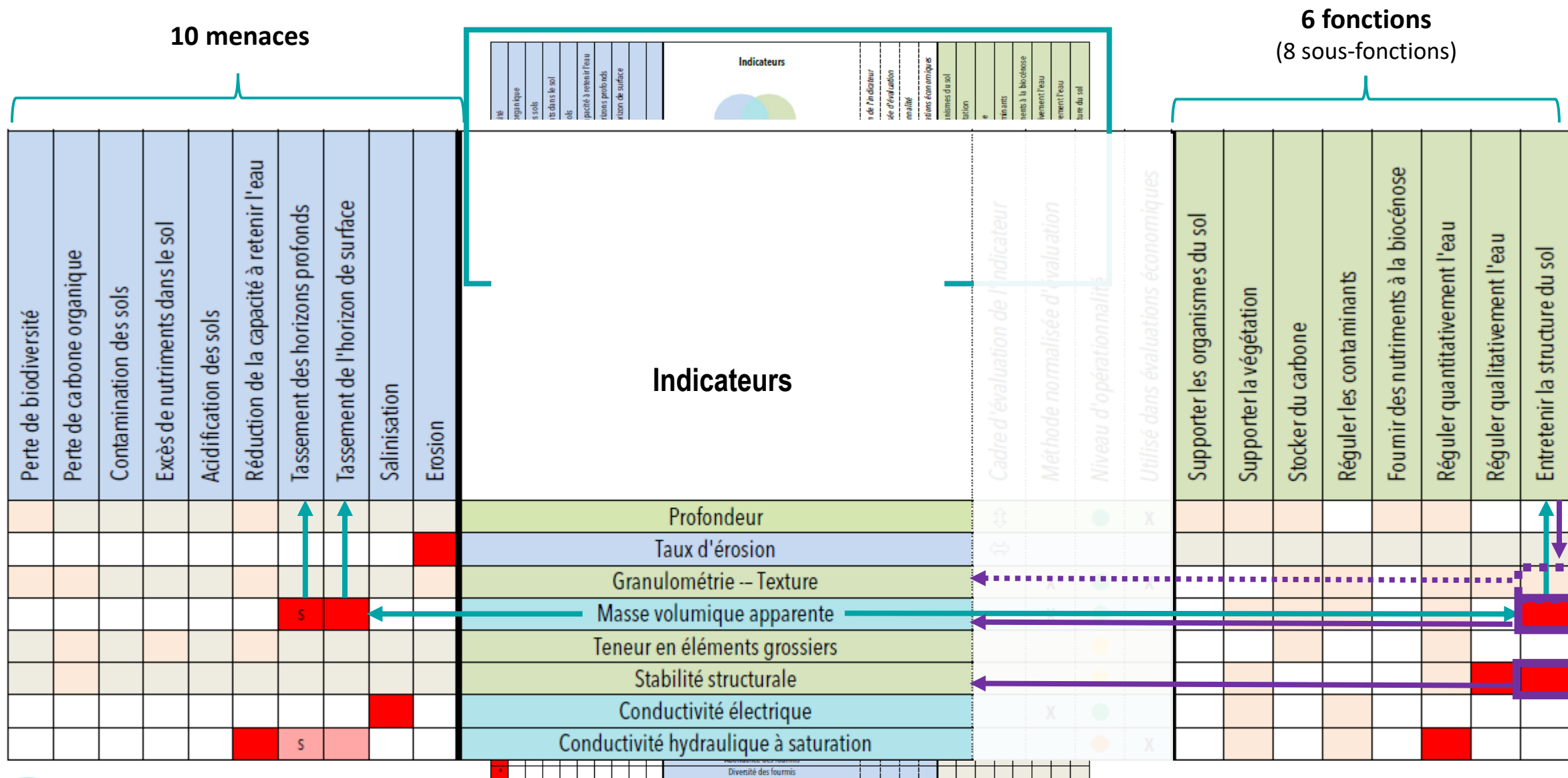
Isabelle Cousin, INRAE-Info&Sols



## ➤ Co-construire conjointement un système d'indication, entre acteurs et experts scientifiques

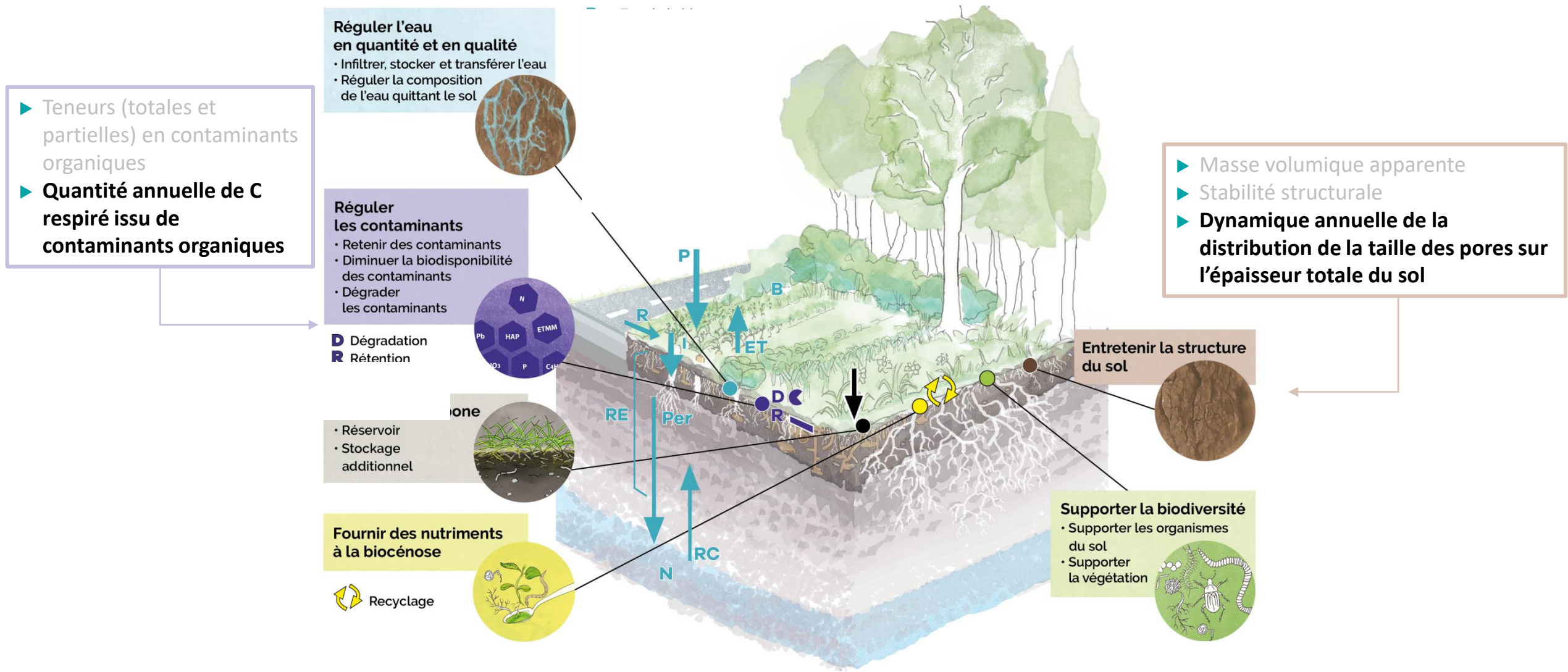


# ➤ Une liste d'indicateurs (prête à l'emploi)



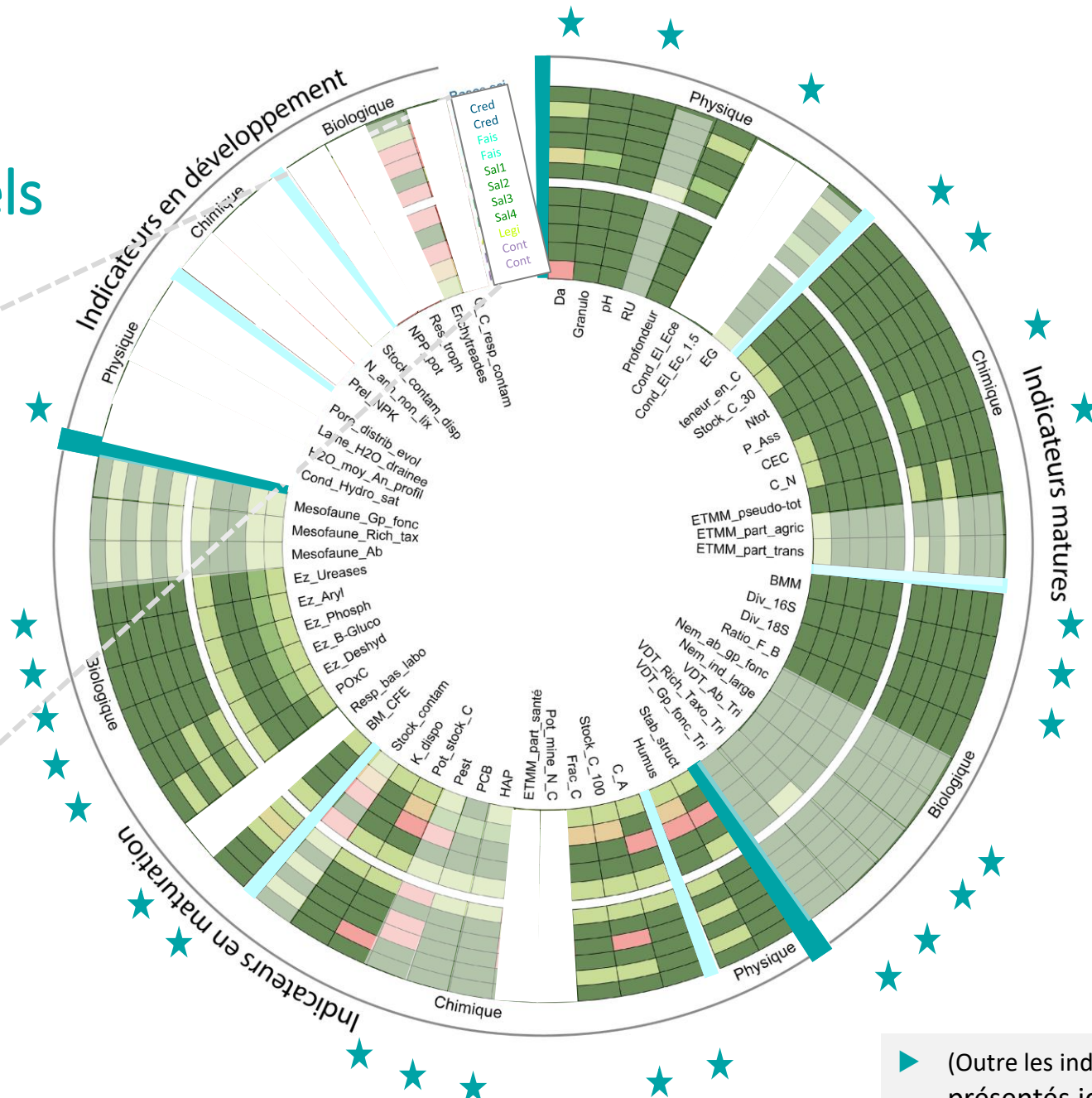
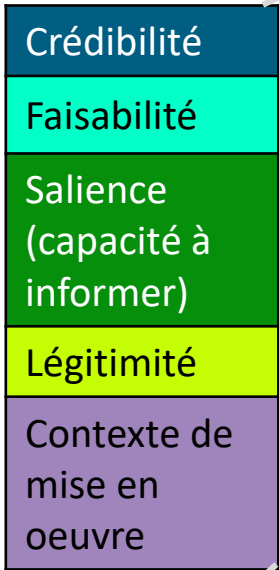


# ➤ Des indicateurs « idéaux » pour caractériser des fonctions



# Des indicateurs opérationnels

Opérationnalité technique  
Opérationnalité d'usage



★ Indicateurs proposés dans la Soil Monitoring and Resilience Law  
-> **28**

Indicateurs absents du réseau RMQS  
 -> **15** (dont **10** indicateurs idéaux)

Indicateurs mesurés sur certains points du réseau RMQS  
 -> **16**

Indicateurs mesurés sur tout le réseau RMQS  
 -> **29**

▶ (Outre les indicateurs idéaux), **seulement 5** des indicateurs présentés ici ne sont pas mesurés sur le RMQS



➤ **Référentiel d'interprétation des indicateurs**  
Guénola Pérès, Institut Agro Rennes-Angers





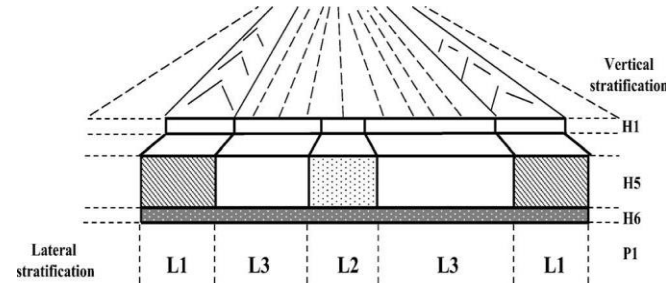
# ➤ Méthodes directes et indirectes

## Sur le terrain

### Méthodes directes

Terrain

Laboratoire



Description profil de sol



Evolution de la MO



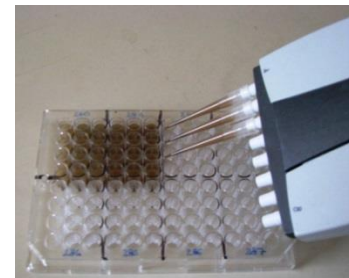
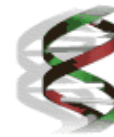
Infiltration

Encadrement de la mesure des indicateurs : existence d'un grand nombre de normes « qualité des sols » (ISO, AFNOR)

	Chimique	Physique	Biologique
Normes existantes	≈ 80 normes	≈ 20 normes	≈ 20 normes

Des indicateurs pouvant être mesurés par différentes méthodes – Ex : Carbone, CEC

## Au laboratoire, à partir d'échantillons prélevés sur le terrain



- extraction (chimique, biologique : ADN, individus)
- analyse-mesure (chimique, physique, biologique)
- détermination des espèces (faune du sol)



# ➤ Méthodes directes et indirectes

## Méthodes indirectes

Terrain, Laboratoire

Modélisation

Proxidétection

Téledétection

Fonction de  
pédotransfert



Conductivité électrique

Spectroscopie proche  
infrarouge (NIRS)

**Masse volumique**

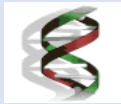
$$= 0.35888 + (1.1833 \times e^{-0.115095 \times \text{SOC}}) + (0.0000722 \times \text{SABLE}) - (0.0007188 \times \text{ARGILE})$$

- Teneur de Carbone, Rapport Corg/Argile
- N total, CEC, pH eau
- Conductivité électrique

# ➤ Méthodes – Innovations - Pistes

## Méthodes rapides, intégratrices

« omic »



- Biomasse, structure des communautés microbiennes (bactéries, champignons)
- En développement pour la faune du sol
- ➔ Distinction du réservoir d'ADN vs vivant
- ➔ Diversité - Densité

IA



- Caractérisation des communautés faunistiques (nématodes)

## Méthodes faciles à mettre en œuvre

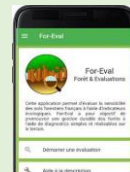
### Sciences participatives

Test bêche (lombriciens)



### Applications smartphone

FOR-EVAL  
(sensibilité sols forestiers)



- ➔ Nécessité d'une calibration des données acquises
- ➔ Mesures fréquentes sur une même parcelle (applications - smartphone)

## Méthodes non destructives

### Proxidétection



### Téledétection



- ➔ Nécessite calibration *via* mesures directes
- ➔ Conditionné par éléments de surface (rugosité, couverture du sol) (téledétection)
- ➔ Mesures fréquentes sur même unité de sol
- ➔ Mesures de plusieurs paramètres (ex: LabSpec - NIRILIS)
- ➔ Résolution spatiale (centimétrique → parcelle → région)

En devenir : détection acoustique (activité biologique)

### Modélisation

- Fonction de pédotransfert
- Intégration de la composante biologique

## ➤ Méthodes – Harmonisation et standardisation

Doit-on aller vers l'harmonisation et standardisation des méthodes ?

Intérêt - Nécessité	Limites
<ul style="list-style-type: none"><li>- Comparabilité des mesures</li><li>- Interopérabilité des bases de données</li><li>- Requis pour paramètres auxquels sont associés des dispositifs réglementaires<ul style="list-style-type: none"><li>- incitations accordées (stockage de C)</li><li>- obligations (restauration, compensation)</li></ul></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- choix et adaptation des méthodes simples ou complexes doivent tenir compte<ul style="list-style-type: none"><li>- des attendus de l'étude</li><li>- du contexte du sol étudié</li><li>- de l'antériorité/existence de base de données de référence</li></ul></li><li>➔ conditionne pertinence et précision des grandeurs mesurées</li></ul>

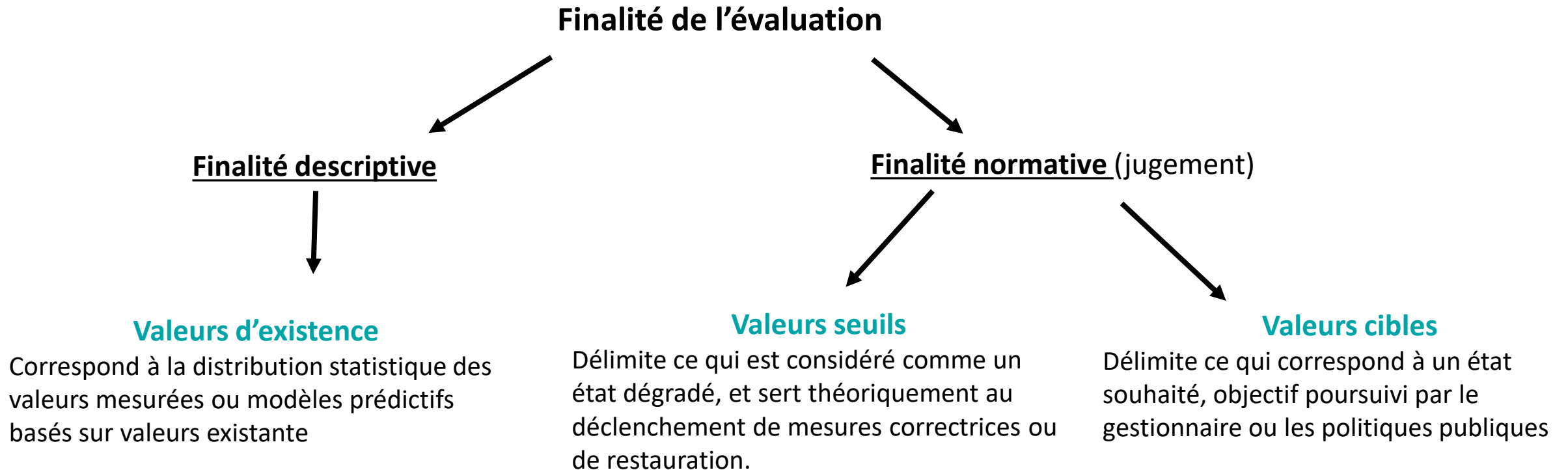
### Orientations

- ➔ Harmonisation à court terme d'une première génération d'indices de qualité des sols
- ➔ MAIS flexibilité dans le choix des méthodes et des protocoles
- ➔ Compromis entre harmonisation et appropriation



# ➤ Définition des valeurs de référence : existence, seuil, cible

Un choix de valeurs en fonction de la finalité de l'évaluation



En fonction des indicateurs, les valeurs seuils sont :

- stabilisées
- non stabilisées

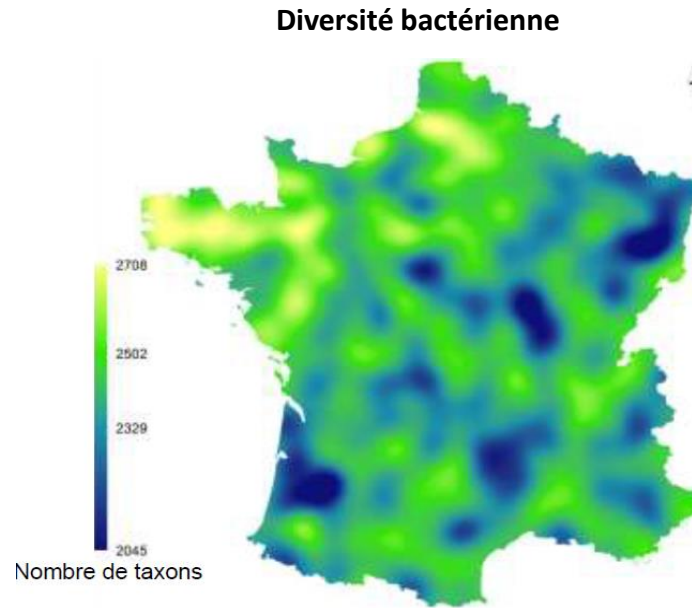


# ➤ Seuils - différentes approches

Seuils issus des textes juridiques

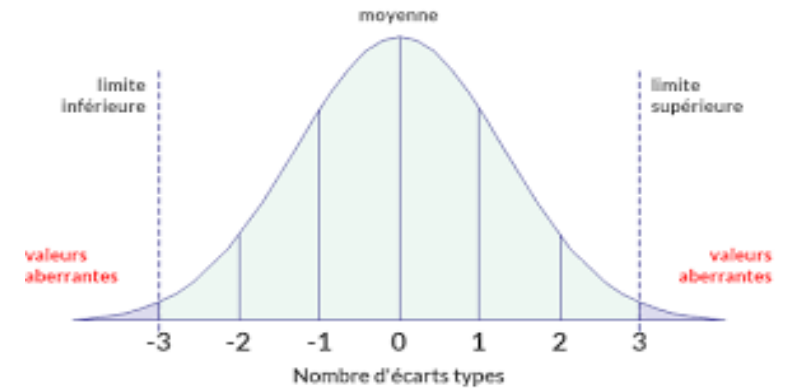


Seuils issus de modèle prédictif



$$\text{Diversité bactérienne} = 1044 + 3.305 \times \text{pH}^4 - 0.0457 \times \text{Argiles}^2 + 0.0597 + 0.00298 \times \text{Argiles}^2 \times \text{C/N} - 1.54 \times 10^{-6} \times \text{Argiles}^3 \times \text{C/N} + 2.336 \times 10^{-5} \times \text{C:N}^2 \times \text{Longitude}$$

Seuils issus de la distribution statistique des valeurs



## ➤ Seuils issus de textes juridiques (SMLR – juin 2024)

Des seuils fixés à l'échelle de l'Europe et d'autres à la discrétion des états

Indicateur	Unité	Usage du seuil – Menaces	Classes et seuils associés
pH eau		Acidification	à définir par chaque état membre
Teneur en P disponible	mg/kg	Excès de nutriment	à définir par chaque état membre
<b>Taux d'érosion</b>	t/ha	<b>Erosion</b>	à définir par chaque état membre (valeur usuelle 2 t/ha)
<b>Conductivité électrique (s)</b>	dS/m	<b>Salinisation</b>	<b>s &lt; 4</b>
Masse volumique apparente (MV) (horizon de surface)	g/cm <sup>3</sup>	Tassement superficiel	à définir par chaque état membre
<b>Masse volumique apparente (MV) (horizon profond)</b>	g/cm <sup>3</sup>	<b>Tassement profond</b>	Dépend de la texture → <b>5 classes</b> Sable: <b>MV &lt; 1.8</b> ; argile <b>MV &lt; 1,47</b>
Stock de carbone	tC/ha	Perte de carbone organique	à définir par chaque état membre
<b>Rapport C<sub>org</sub>/Arg</b>		<b>Perte de carbone organique</b>	<b>C<sub>org</sub>/Arg = 1/13</b> (à adapter par chaque état membre)
<b>Rapport C<sub>org</sub>/Arg</b>		<b>Structure non stable</b>	
<b>Conductivité hydraulique à saturation (K<sub>sat</sub>)</b>	m/s	<b>Tassement profond</b>	<b>K<sub>s</sub> &gt; 10 cm/jour</b>
<b>Capacité d'air</b>	%	<b>Tassement profond</b>	<b>&gt; 5%</b>

A l'échelle européenne:

- 5 indicateurs pour lesquels des seuils sont préconisés
- 4 menaces



**INRAE**

Etude DEPE – Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs

20 novembre 2024 / Colloque de restitution

## ➤ Seuils et fonction



### Fonction « entretenir la structure du sol »

Indicateur = niveau de stabilité de la structure du sol

#### Stabilité structurale des agrégats (MWD)

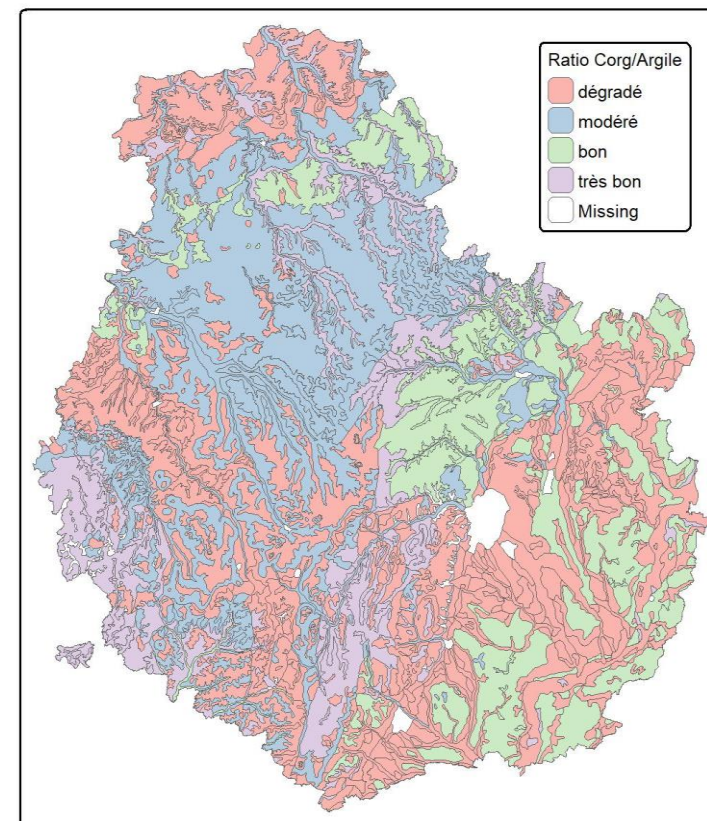
→ Niveaux de stabilité (Le Bissonais, 1996)

MWD	Stabilité
< 0,4 mm	Très instable
0,4-0,8 mm	Instable
0,8-1,3 mm	Moyennement stable
1,3-2,0 mm	Stable
> 2,0 mm	Très stable

#### Ratio Carbone/Argile

→ Niveaux de stabilité (SMLR)

Ratio carbone/argile	Stabilité de la structure du sol
> 1/8	Très bon
1/10 – 1/8	Bon
1/13 – 1/10	Modéré
<1/13	Dégradé



➔ Au-delà de ces exemples, connaissances encore lacunaires sur les valeurs seuils des fonctions

# ➤ Synthèse sur l'existence des seuils

Sur 50<sup>aine</sup> indicateurs

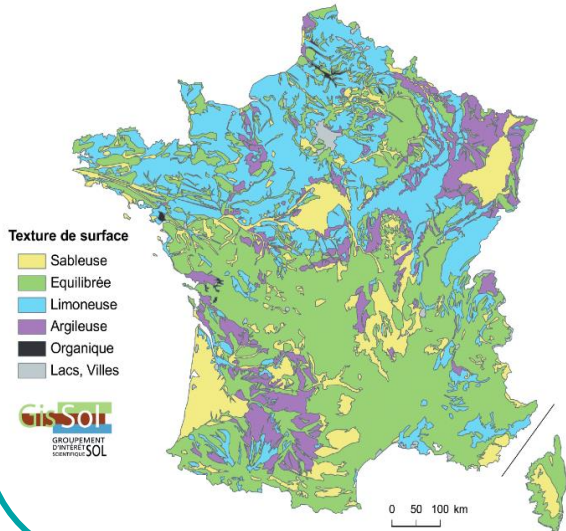
→ 10<sup>aine</sup> indicateurs (physique, *chimique*) avec seuils

Pourquoi peu de seuils génériques ?

## contexte-dépendance des seuils

### Contexte pédoclimatique

La texture des horizons supérieurs du sol en France métropolitaine



### Usage des sols



### Culture



## base de données



phase de consolidation



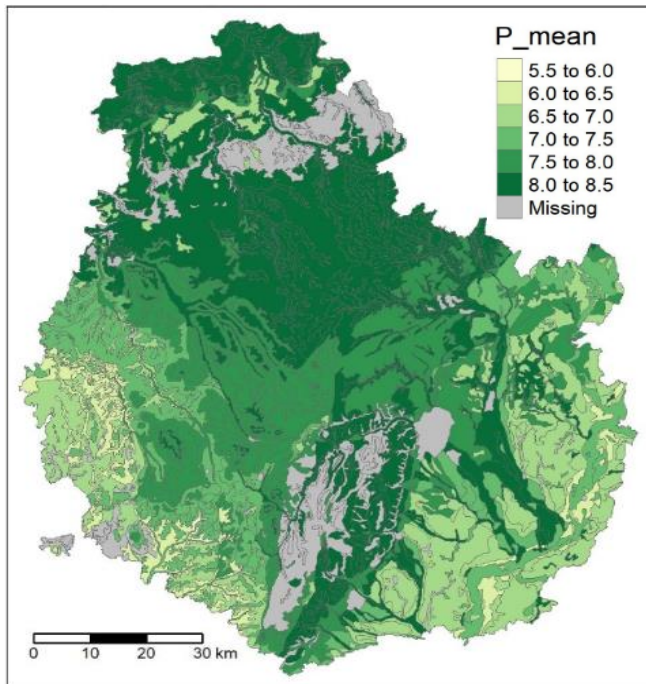
# ➤ Application



Fournir éléments biocénose

## Valeurs d'existence

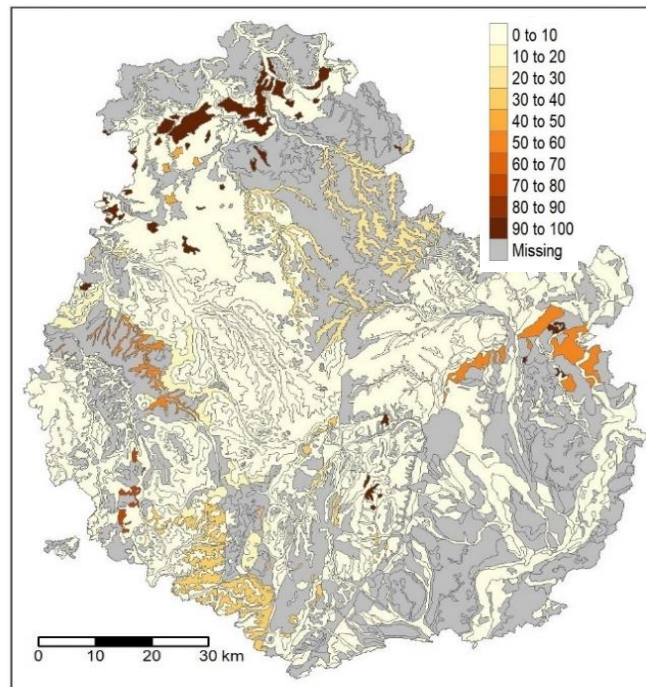
Teneur en Phosphore (mg/kg)



Entretien structure

## Valeurs seuils

Dégradation par le tassement des sols profonds (indicateur = masse volumique)



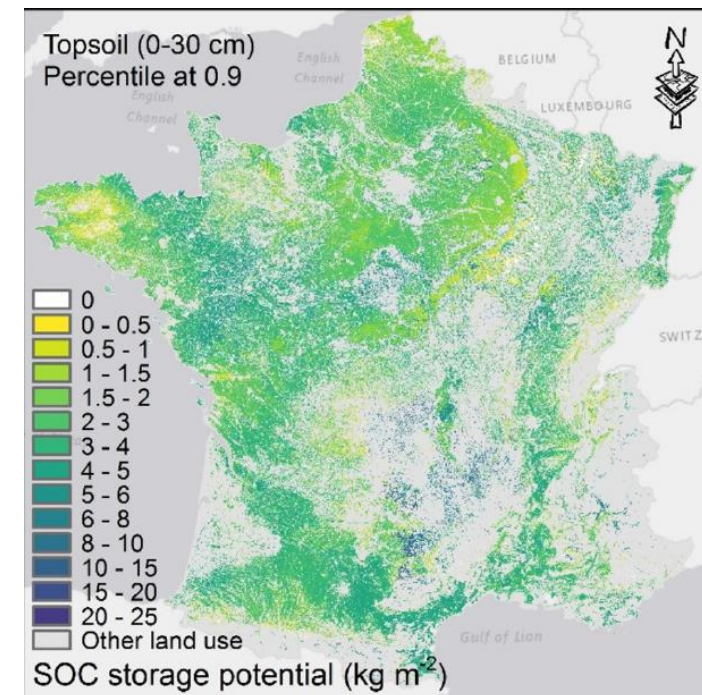
Proportion, par Unité cartographique, des Unités Typologique dont les valeurs de masse volumique dépassent les valeurs seuils (SMLR)



Stockage carbone

## Valeurs cibles

Potentiel de stockage du carbone organique (kg/m<sup>2</sup>)



- ➔ Outils permettant le diagnostic de santé des sols
- ➔ Outils mobilisables dans les stratégies d'aménagement du territoire, de restauration



INRAE

Etude DEPE – Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs

20 novembre 2024 / Colloque de restitution

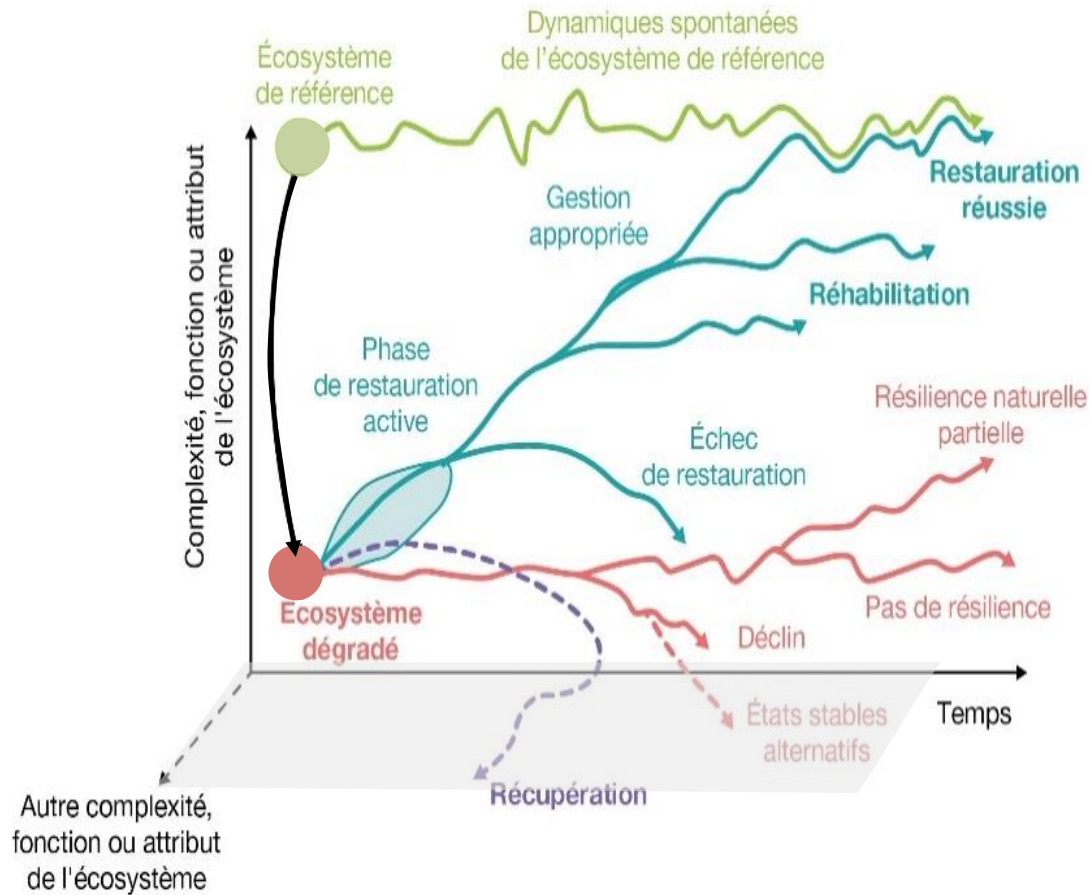


**INRAE**

➤ **De la lutte contre l'artificialisation à la restauration  
écologique**

Philippe Branchu (TEAM, Cerema)

## ➤ Précisions terminologiques : domaine de la restauration écologique



(tiré de Jaunâtre, 2013, d'après Aronson et al., 1993 ; Buisson, 2011).

(x, z) plan de l'écosystème de référence

Ecosystème de référence

Restauration

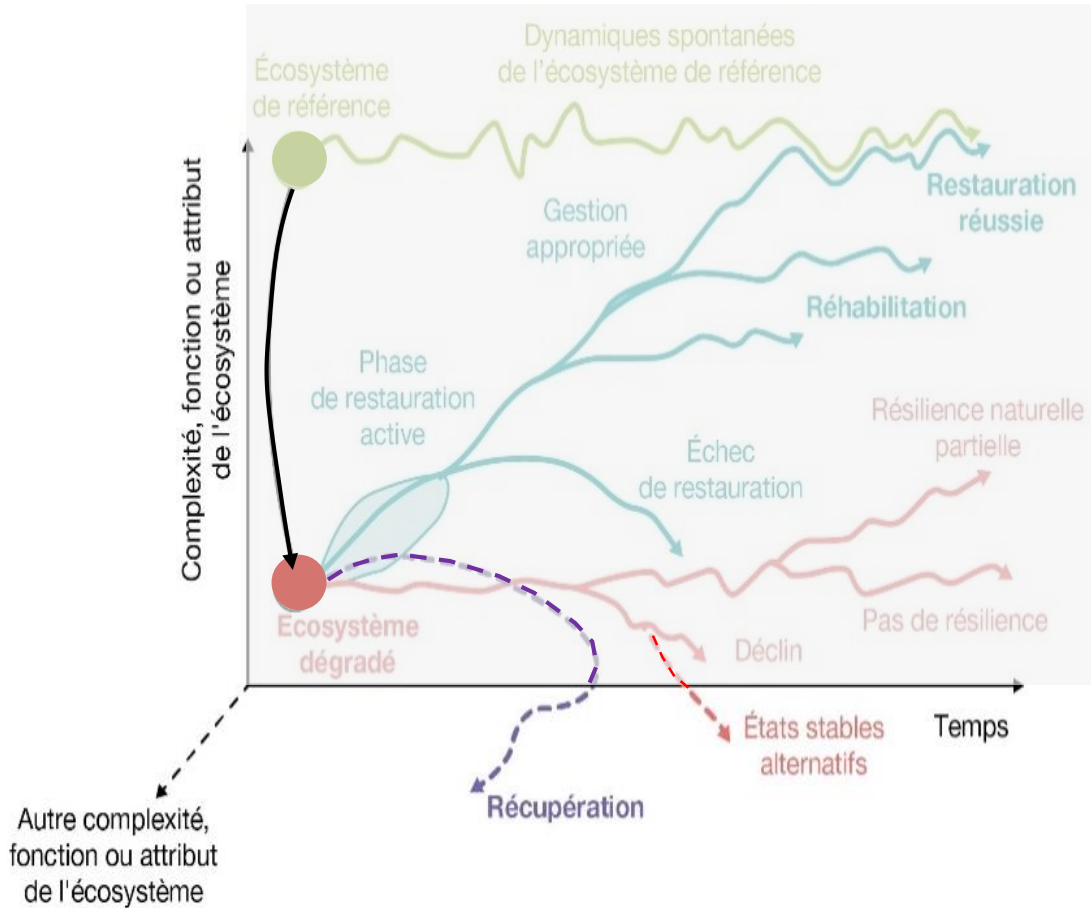
Réhabilitation

Résilience

« La **restauration écologique** est le processus qui assiste le **rétablissement** d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit » (SER, 2004).

Objectif : rétablissement de tous les attributs de l'écosystème de référence

## ➤ Précisions terminologiques : domaine de la renaturation



(x, y) plan de la renaturation

**Autre (éco)système**

Récupération =

Rétablissement =

Assainissement =

Remise en état

«La **renaturation d'un sol**, ou désartificialisation, consiste en des actions ou des opérations de restauration ou d'amélioration de la **fonctionnalité** d'un sol, ayant pour effet de transformer un sol artificialisé en un sol non artificialisé .» (Loi Climat & Résilience, 2021)

**Objectif** : amélioration de tout ou partie (?) des fonctions écologiques d'un sol : hydrique, climatique, biologique + potentiel agronomique

# ➤ Restauration, renaturation des sols : prise en compte des sols

Ingénierie pédologique  
+  
Ingénierie écologique

(C) (P)  
manipulation  
(B)

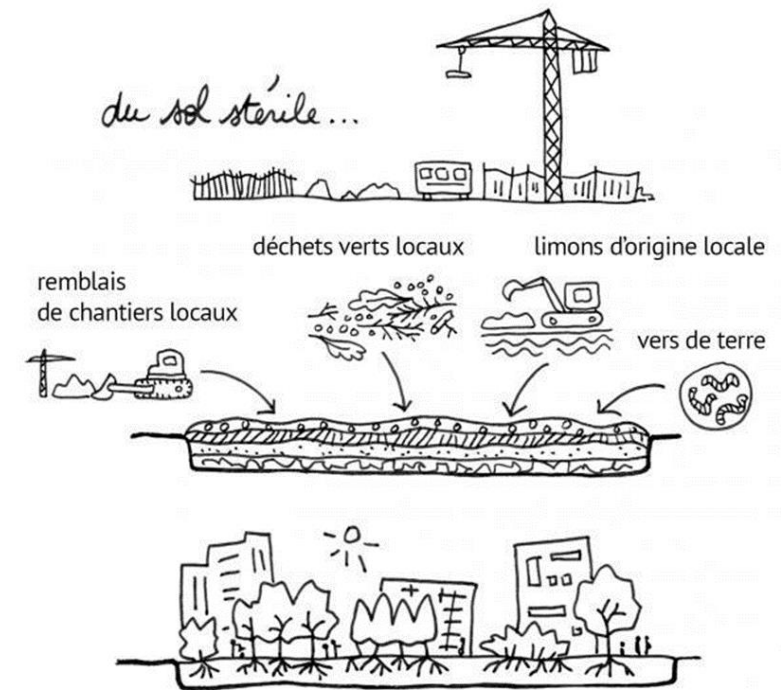


- Etrépage de sol
- Transfert de sol



- Descellement,
- Décompactage,
- Enrichissement en matière organique
- Fabrication d'un nouveau sol
  
- Inoculation de champignons, bactéries
- Transplantation d'organismes ingénieurs du sol : vers de terre, fourmis, ..

**Fabrication de Technosols /Anthroposols**



INRAE

Etude DEPE – Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs

20 novembre 2024 / Colloque de restitution

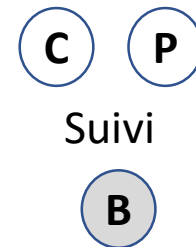
## ➤ Quelle évaluation ?

### Restauration écologique

- Suivis biologiques
- Surveillance de la biodiversité
- Evaluation de la végétation
- **Mesure des propriétés du sol**
- Rétablissement des processus et fonctions écologiques
- Mesures socio-économiques
- Engagement communautaire

**Long terme**

### Suivi et évaluation



### Renaturation des sols

Suivi des paramètres physiques, chimiques et biologiques\* liés à la gestion des eaux, la fertilité, le sanitaire, le développement de la végétation

**Court terme**

*\* (respiration, biomasse microbienne, activités enzymatiques)*

**Pas ou peu d'approche fonctionnelle « sol »**

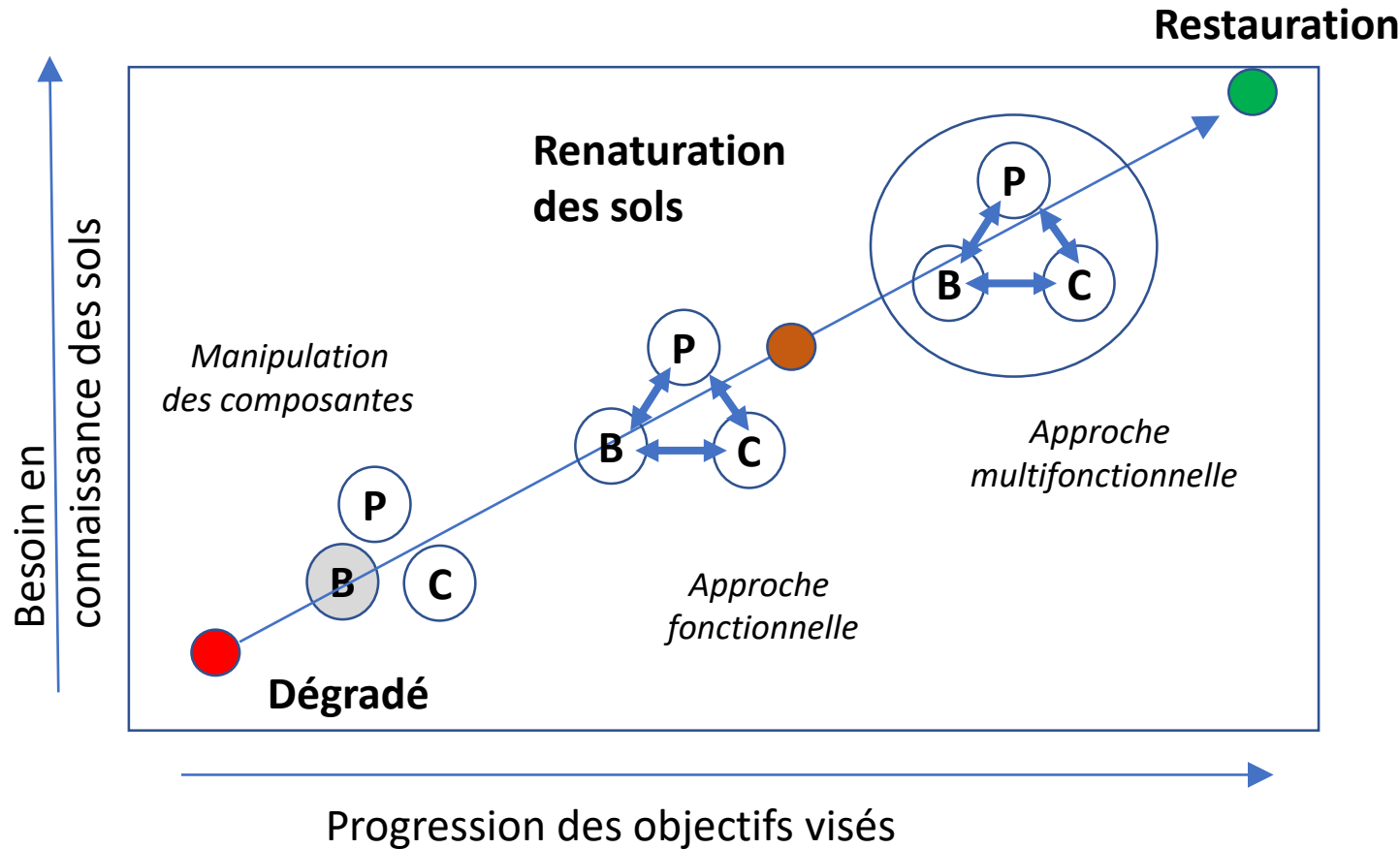
**INRAE**

**Lien aux fonctions des sols**

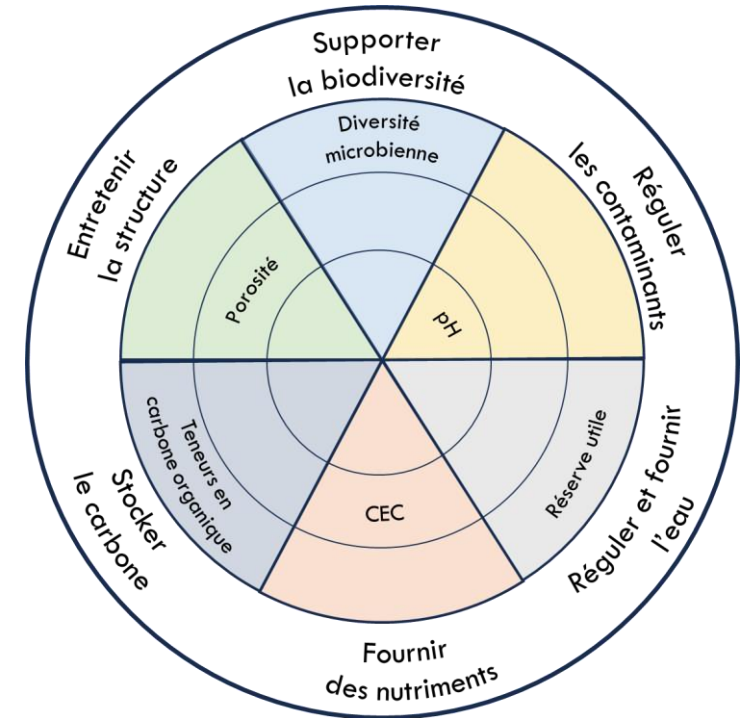


# Evaluation proposée pour la renaturation des sols et la restauration ?

La restauration et la renaturation des sols au regard de l'évaluation de la fonctionnalité des sols



Roue de la multifonctionnalité des sols



Adapté de Heneghan *et al.* (2008)

R. Gros pour l'étude IndiQuaSols (2024)



**INRAE**

Etude DEPE – Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs

20 novembre 2024 / Colloque de restitution

## ➤ Conclusions

- Des termes **restauration écologique** versus **renaturation des sols** = des visions **écocentrée** versus **pédocentree**
- La restauration écologique considère fonctions et attributs de l'écosystème mais peu les fonctions du sol implicitement associées
- Proposition d'associer l'évaluation des fonctions des sols dans le champ de la restauration écologique et de la renaturation des sols
  
- Dynamique temporelle de la renaturation des sols plus rapide que celle de la restauration écologique et que le processus naturel de formation des sols
  
- Des approches opérationnelles (renaturation des sols) en avance de phase sur la connaissance
  
- La restauration écologique et la renaturation des sols : des processus assistés nécessitant des mesures de gestion parfois correctives

**INRAE**

➤ **La qualité des sols dans la gouvernance territoriale**

Adrien Baysse-Lainé, CNRS-UMR Pacte

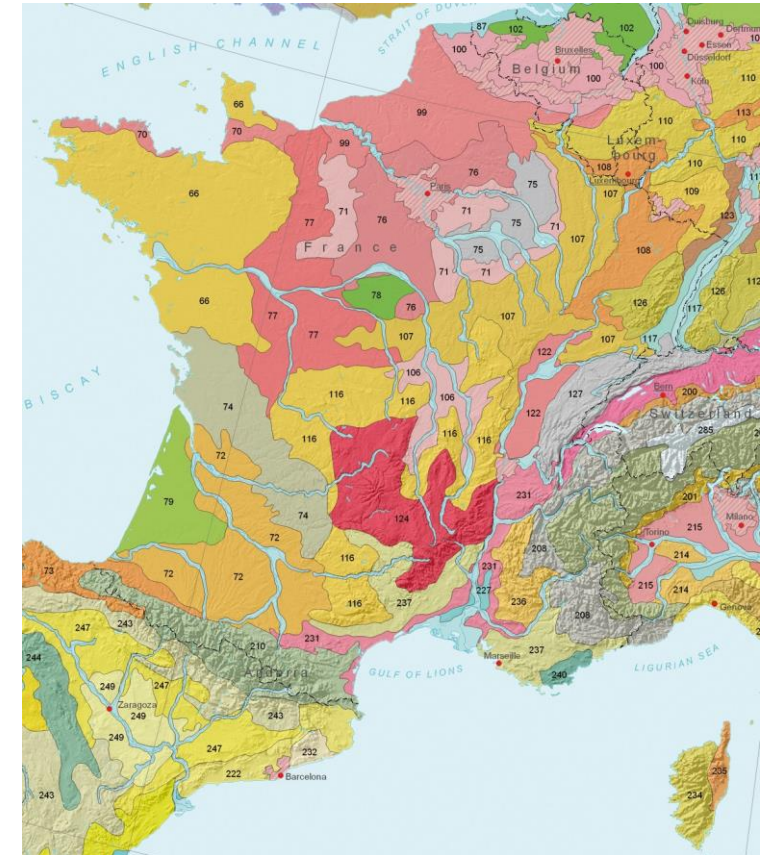
# ➤ Des débats sur l'échelle optimale de gouvernance de la qualité des sols

Echelle locale ou régionale, mais :

instances de **coordination** autour de chaque enjeu / **fonction** des sols, échelle variable

**autorité** autonome, gestion **intégrée** des sols, périmètre administratif et environnemental

(projet de directive européenne)



Source : carte des *soil regions* de l'UE et pays voisins

(BGR : institut fédéral allemand des géosciences et des ressources naturelles)



INRAE

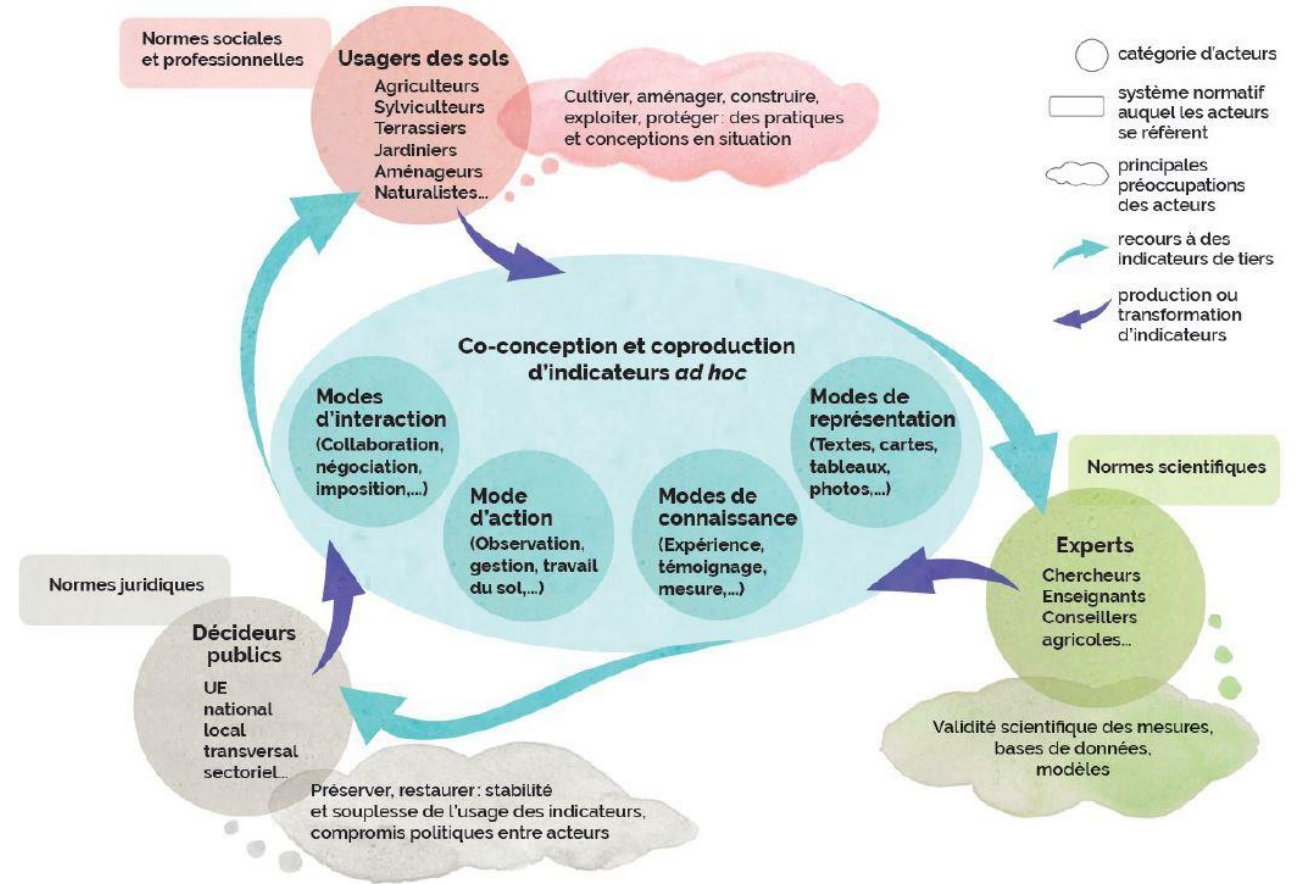
Etude DEPE – Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs

20 novembre 2024 / Colloque de restitution

# ➤ Le défi de s'accorder entre parties prenantes sur ce que les sols sont, font, valent et devraient être

Caractérisation de la qualité par les paramètres les plus **contraignants** ou **sensibles** par rapport à une activité → ex. terrassiers # agriculteurs irrigants.

Déterminants sociaux de la diversité de conceptions et de modes d'attention → **normes sociales** et réseaux de relations.



Source : rapport de l'étude.



**INRAE**

Etude DEPE – Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs

20 novembre 2024 / Colloque de restitution



## ➤ Les indicateurs scientifiques ont une existence socio-politique

Un indicateur qui « réussit » - est mobilisé - n'est pas nécessairement scientifiquement optimal : **dépendance au sentier**.

**Objet-frontière** comme facteur de réussite : transversalité entre mondes sociaux (communication), avec des sens potentiellement différenciés → structure stable permettant des reformulations selon l'évolution des objectifs.

### RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)

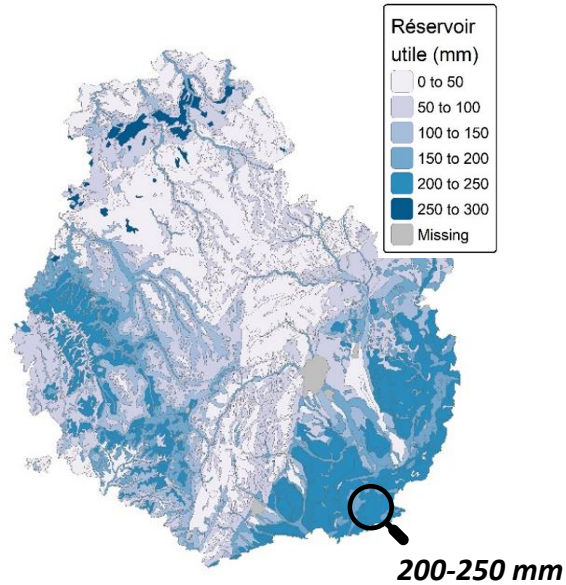
$$\begin{aligned} & \text{Érosion} \\ & = \\ & \text{Erosivité des précipitations} \\ & \times \\ & \text{Erodabilité du sol} \\ & \times \\ & \text{Longueur et inclinaison de la pente} \\ & \times \\ & \text{Couverture végétale} \\ & \times \\ & \text{Pratiques de gestion des sols} \end{aligned}$$



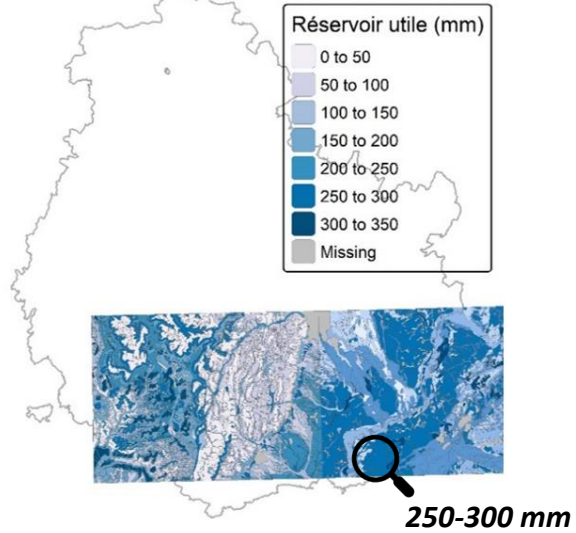
➤ Quelques recommandations pour évaluer les fonctions des sols, leur qualité, et leur santé

Isabelle Cousin, INRAE-Info&Sols

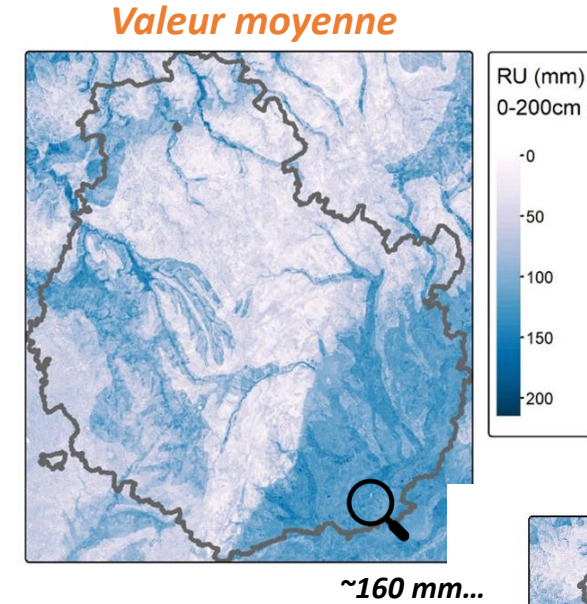
# ➤ Evaluer des indicateurs avec des données à échelles variables... et donner des incertitudes



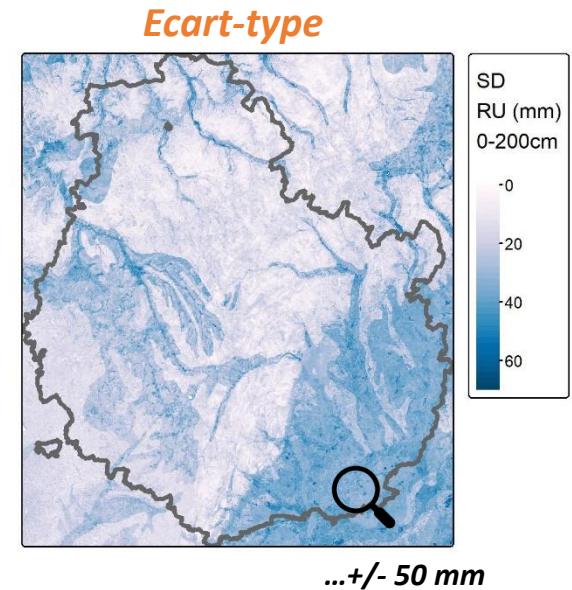
Référentiel Régional  
Pédologique  
1/250 000



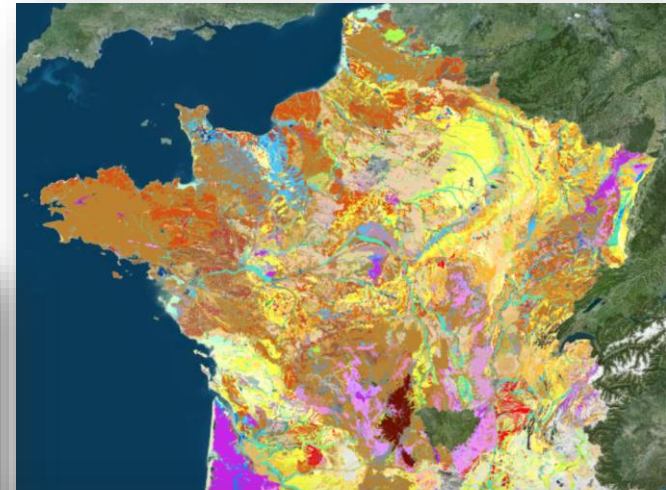
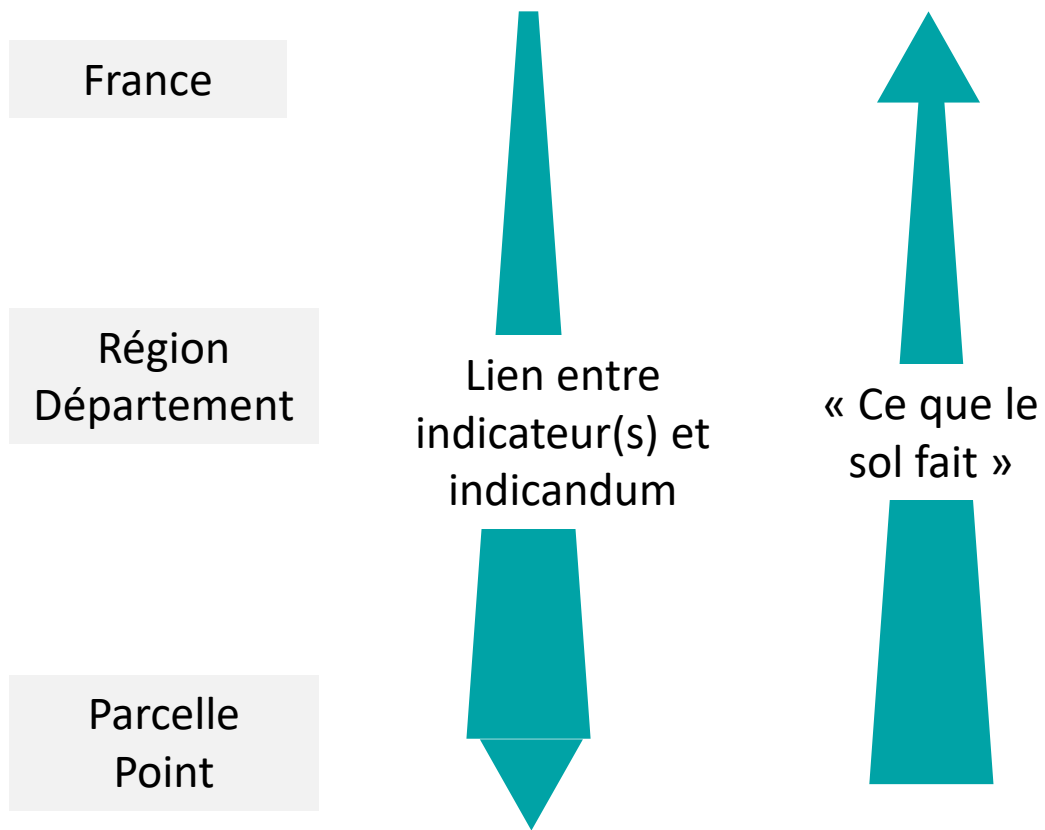
Carte Pédologique  
de France  
1/50 000



GlobalSoilMap  
1 pixel :  
100m X 100m



# ➤ Développer les indicateurs idéaux



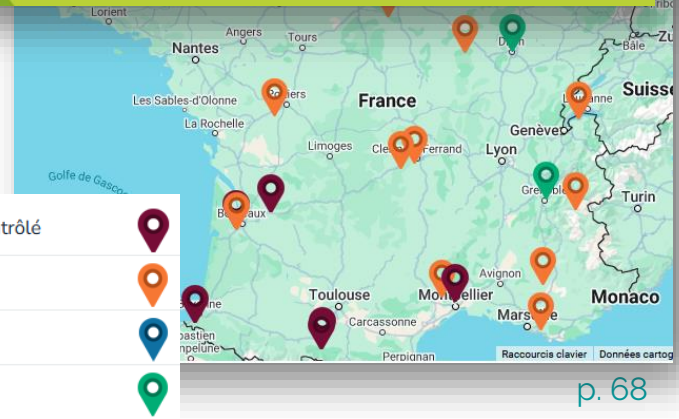
EUROPEAN UNION

## EU MISSIONS

**SOIL DEAL FOR EUROPE**

100 living labs and lighthouses to lead the transition towards healthy soils by 2030

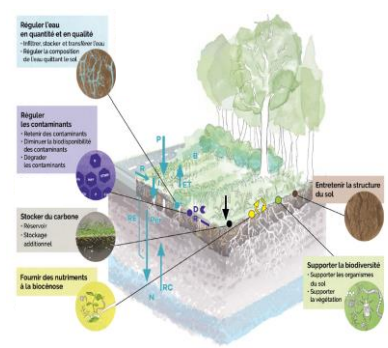
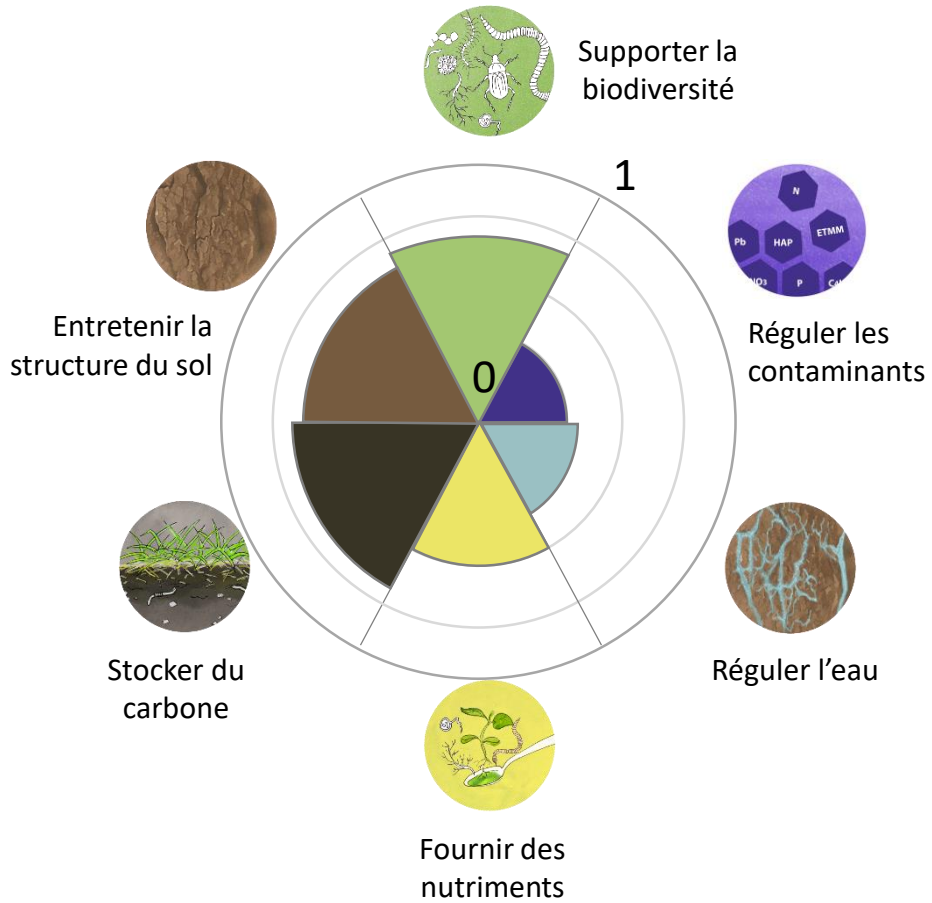
#EUmissions #HorizonEU #MissionSoil





# Evaluer la multifonctionnalité

Réaliser des **profils fonctionnels**



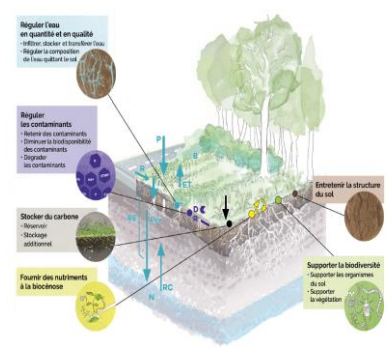
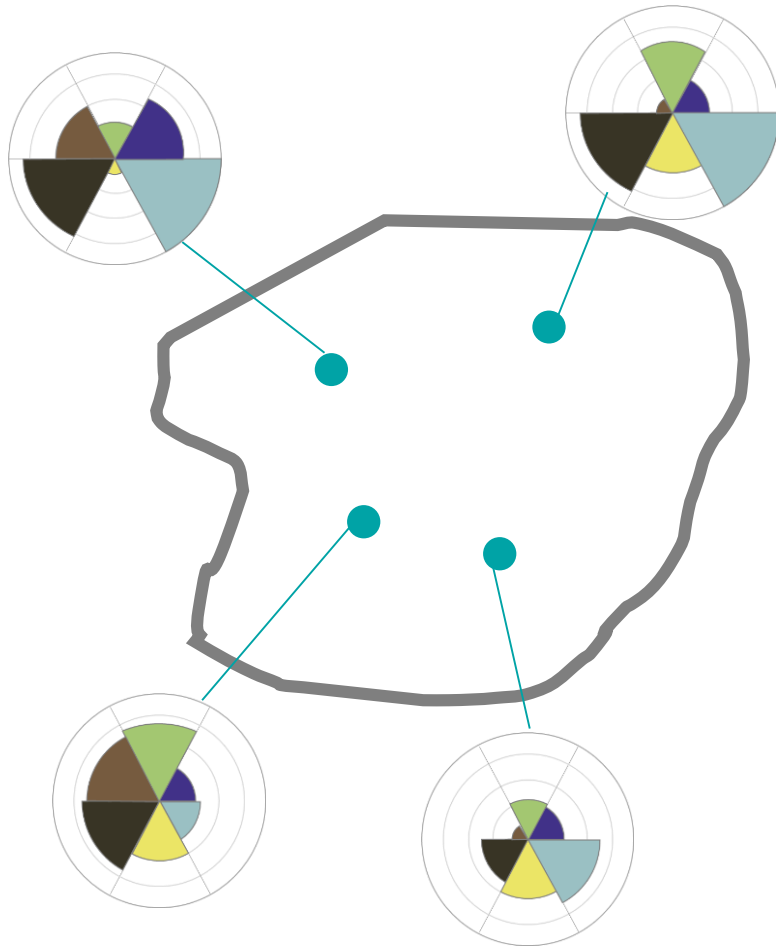
**INRAE**

Etude DEPE – Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs  
20 novembre 2024 / Colloque de restitution



# ➤ Evaluer la multifonctionnalité

Réaliser des **profils fonctionnels**

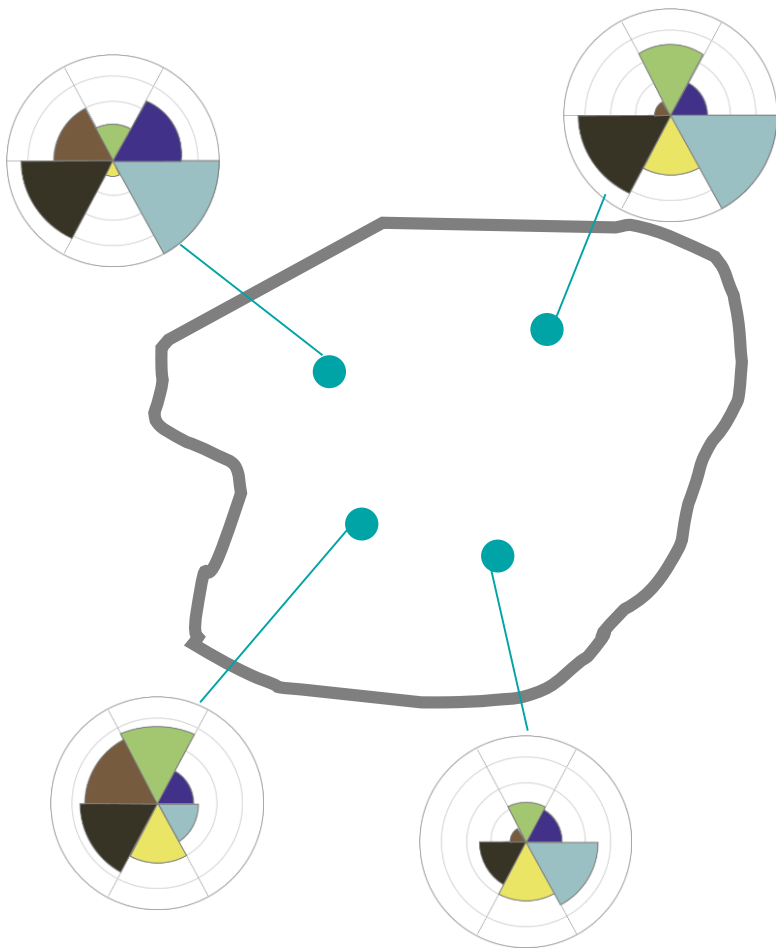


**INRAE**

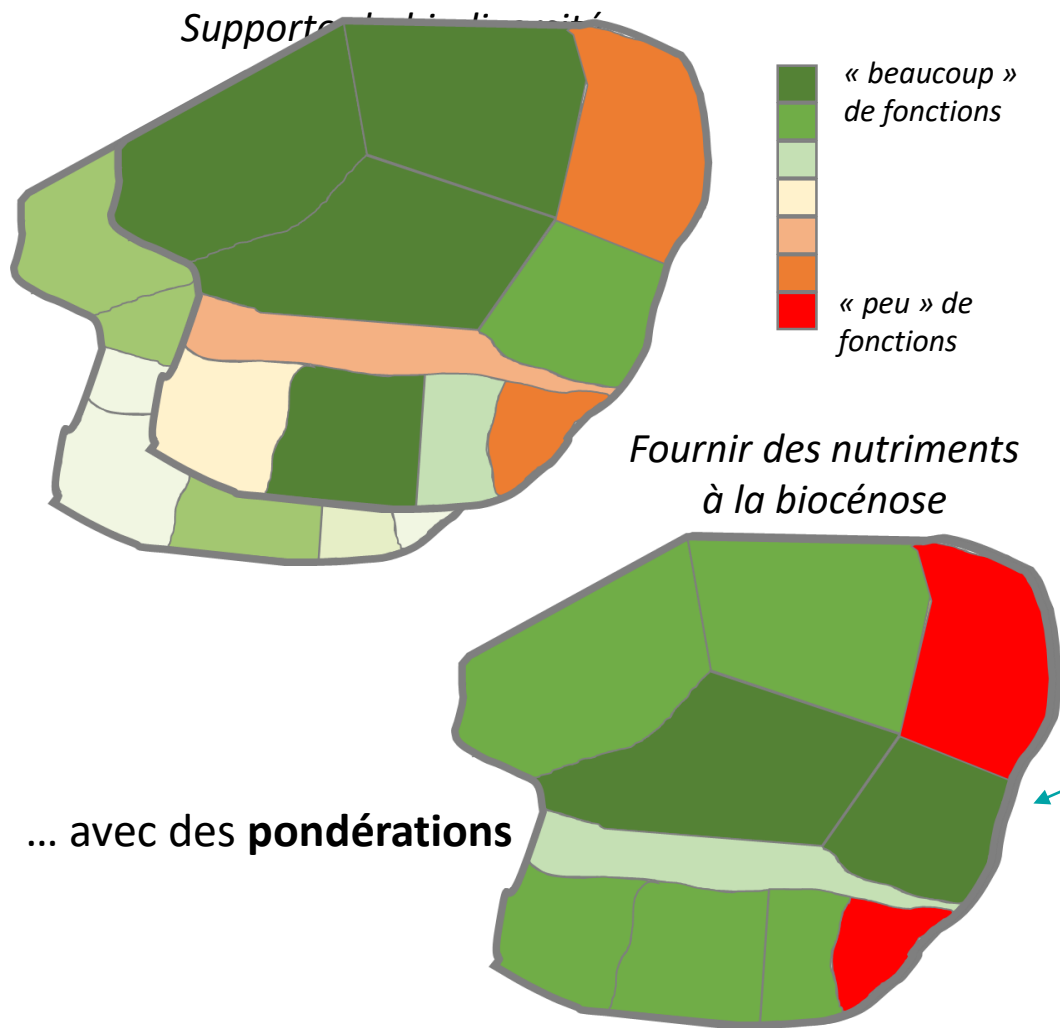
Etude DEPE – *Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs*  
20 novembre 2024 / Colloque de restitution

# ➤ Evaluer la multifonctionnalité

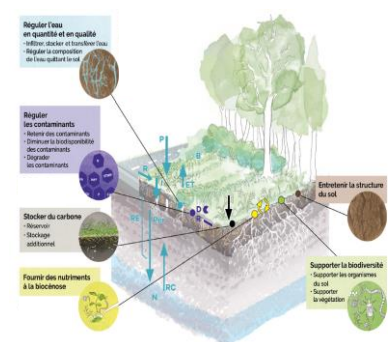
Réaliser des **profils fonctionnels**



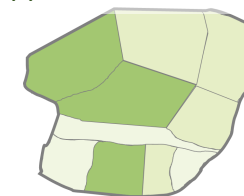
Cumuler des fonctions...



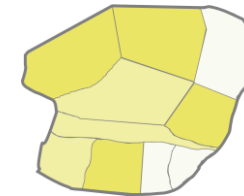
... avec des pondérations



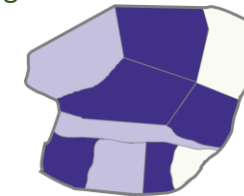
Supporter la biodiversité



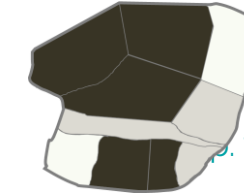
Fournir des nutriments



Réguler les contaminants



Stocker du Carbone



# INRAE



## Conclusion

Isabelle Cousin, INRAE-Info&Sols

Maylis Desrousseaux, Ecole d'urbanisme de Paris

## ➤ Messages à emporter

- ▶ Questionner le bien-fondé d'une **approche sectorielle** : le sol, pour le sol ?
- ▶ Améliorer le **droit à l'information** en matière **d'environnement**
- ▶ Evaluer la qualité/santé des sols : une approche par les **fonctions écologiques**, quel que soit l'usage des sols
- ▶ Développer un **système d'indication** pour évaluer la qualité des sols :
  - ▶ **Finalité** <-> collectivisation des enjeux
  - ▶ **indicandum** -> indicateur(s), évaluation
- ▶ Proposer une **liste ad hoc d'indicateurs**; valeurs d'existence, valeurs seuils, valeurs cibles
- ▶ Des indicateurs de fonctions des sols pour qualifier la **renaturation** ou la **restauration** des sols



ÉCOLE  
D'URBANISME  
DE  
PARIS

UNIVERSITÉ PARIS-EST CRÉTEIL  
UNIVERSITÉ GUSTAVE EIFFEL

INRAE

L'INSTITUT  
agro Rennes  
Angers

 Cerema  
CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN

  
Institut de Recherche  
pour le Développement  
FRANCE



cnrs

amU  
Aix Marseille Université

UNIVERSITÉ  
TOULOUSE  
CAPITOLE

L'INSTITUT  
agro Dijon

cnrs

SCIENCES HUMAINES  
& SOCIALES



Agriculture et  
Agroalimentaire Canada

Agriculture and  
Agri-Food Canada

AgroParisTech 

INRAE

Etude DEPE – Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs  
20 novembre 2024 / Colloque de restitution





## ➤ Table ronde

- **Mirco BARBERO**, Chargé de mission Protection des sols et utilisation durable des terres, Direction générale Environnement, Commission européenne
- **Nicole BONNEFOY**, Sénatrice de la Charente (Nouvelle Aquitaine), Vice-Présidente de la Commission de l'Aménagement du territoire et du Développement durable
- **Cécile CLAVEIROLE**, Vice-présidente de France Nature Environnement (FNE), Représentante FNE au Conseil Economique Social et Environnemental (CESE)
- **Stéphane RAFFALLI**, Maire de Ris-Orangis, Vice-Président de Grand Paris Sud Seine-Essonne, Sénart et Conseiller départemental de l'Essonne