



De la qualité à la santé des sols : quels indicateurs ?



Isabelle Cousin¹, Maylis Desrousseaux², Sophie Leenhardt³

¹UR Info&Sols, INRAE, Orléans

²Ecole d'Urbanisme de Paris, Champs sur Marne

³DEPE, INRAE, Paris



*Etude INRAE :
Préserver la Qualité des sols -
vers un référentiel d'indicateurs*

➤ Les sols, multifonctionnels, ...mais dégradés



Evaluer la qualité/santé des sols

Des initiatives multiples d'évaluation de la santé des sols...

Qualité des sols abordée en silo dans les différents domaines juridiques rural, urbanisme, environnement, forêt, énergie, etc.

Des initiatives législatives propositions de lois Bonnefoy (2023), Ramos (2023)

Deux instruments intégrateurs

- UE proposition Directive cadre 2023 - « Soil Monitoring and Resilience Law »
- Loi Climat et résilience de 2021



10/04/2025

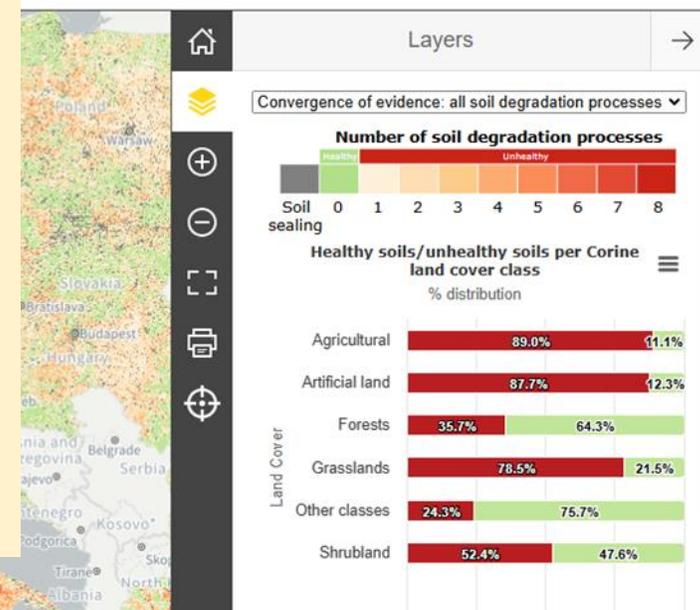


21/05/2025



Soils and SDC

Healthy soil perform/pr key function and ecosyst



<https://esdac.jrc.ec.europa.eu/esdacviewer/euso-dashboard/>

➤ Méthodes de l'étude

Les expert.e.s

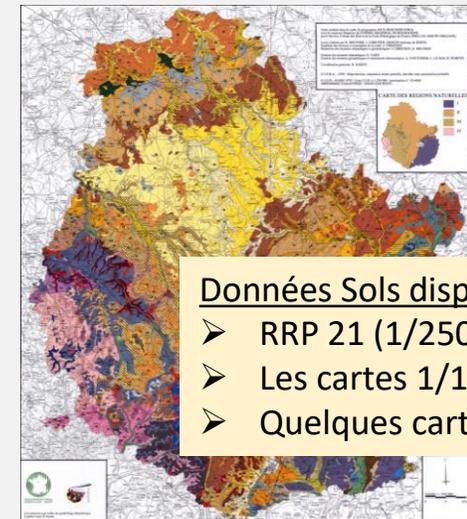
- 19 experts scientifiques
- 1 cheffe de projet
- 2 pilotes : droit et physique du sol
 - **Sciences du sol** (physique, chimie, biologie, microbiologie, pédologie)
 - **Ecologie**
 - **Agronomie et sylviculture**
 - **Anthropologie**
 - **Sociologie**
 - **Géographie**
 - **Economie**
 - **Droit**
 - **Statistiques, géostatistiques, modélisation**

Le corpus de l'étude

- **1800** références citées
 - ☛ dont **1 500 articles** revus par les pairs
 - ☛ **260 revues de littérature**
 - ☛ Place relativement importante de la **littérature grise** (ouvrages, rapports ...)
 - ☛ Corpus majoritairement axé sur les **contextes agricoles**
 - ☛ ~~Sols pollués, Effet des pratiques~~

La zone test

- **entité administrative** (pour application possible PP)
- qui possède une **large gamme de sols**
- et des **occupations variées**
- sur laquelle on dispose de **données sols à différentes échelles** (tests de différents niveaux de complexité)



Données Sols disponibles :

- RRP 21 (1/250 000)
- Les cartes 1/100 000 de Beaune et Dijon
- Quelques cartes locales très précises

➤ Artificialiser, c'est dégrader

Loi Climat et Résilience -> 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. »

La loi Climat et résilience :

- ▶ marque une étape fondamentale dans « l'écologisation » du droit de l'urbanisme
 - ▶ comment qualifier « l'altération durable » ?
 - ▶ Comment préserver les sols de cette altération ?
- ▶ Souligne le besoin de doter les territoires d'un système guidant les arbitrages d'affectation et d'occupation du sol

➔ **Indicateurs**

FONCTION ECOLOGIQUE



INRAE

De la Qualité à la santé des sols : quels indicateurs ? I. Cousin
25 juin 2025



➤ Les fonctions du sol dans la littérature scientifique

Analyse de ~150 articles traitant des fonctions des sols



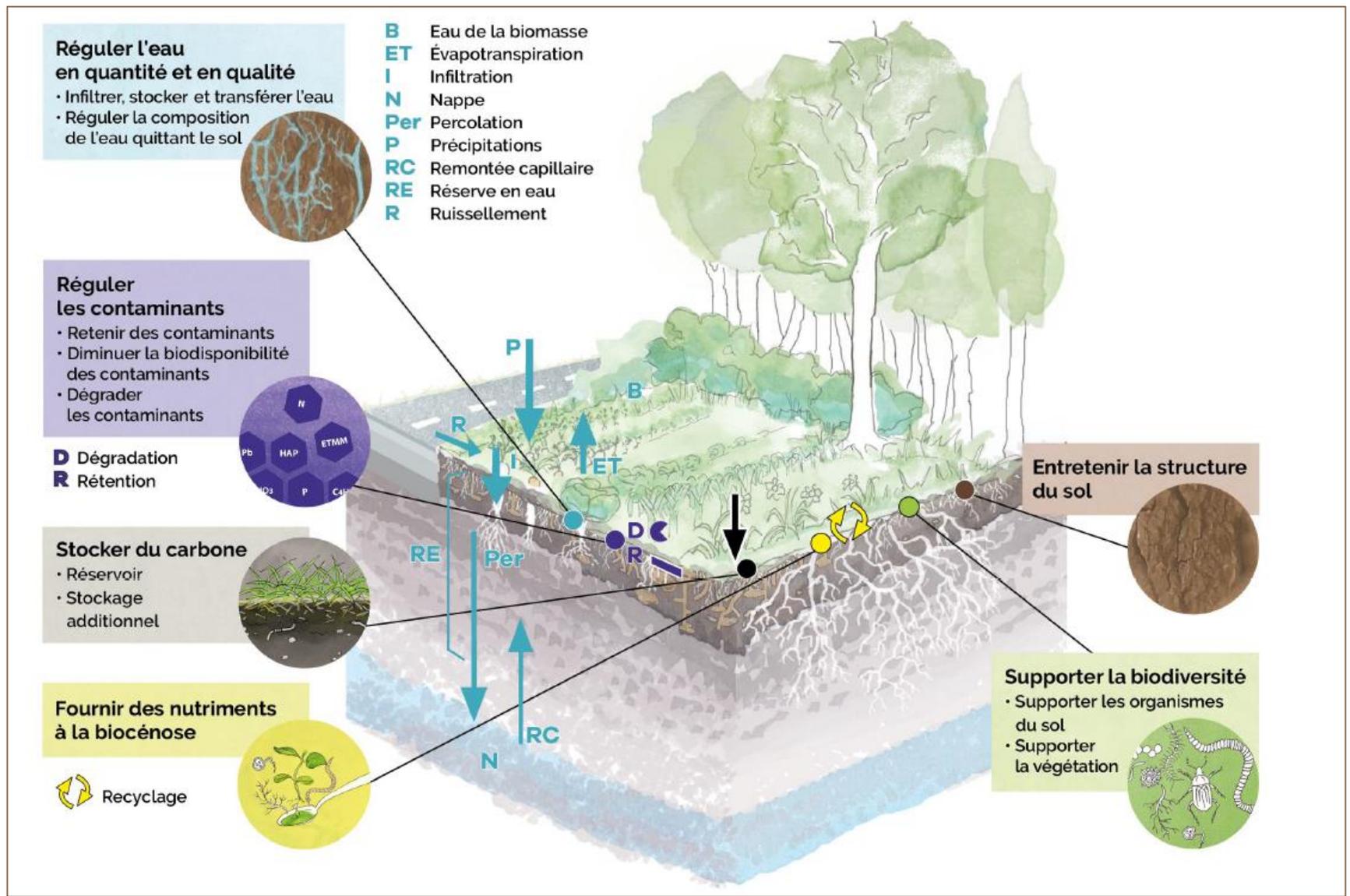
- ▶ des mots qui qualifient des **objets** (*nutrients, water, soil, carbon, etc.*)
- ▶ des mots qui qualifient des **actions** (ex. *cycling, regulation, storage, production, sequestration, etc.*)



Une **fonction écologique** est définie comme une **action** sur un **objet**



➤ Six fonctions (et 8 sous-fonctions) des sols



➤ Des indicateurs de Qualité et Santé

Des **caractéristiques** du sol

- Physiques
- Chimiques
- Biologiques

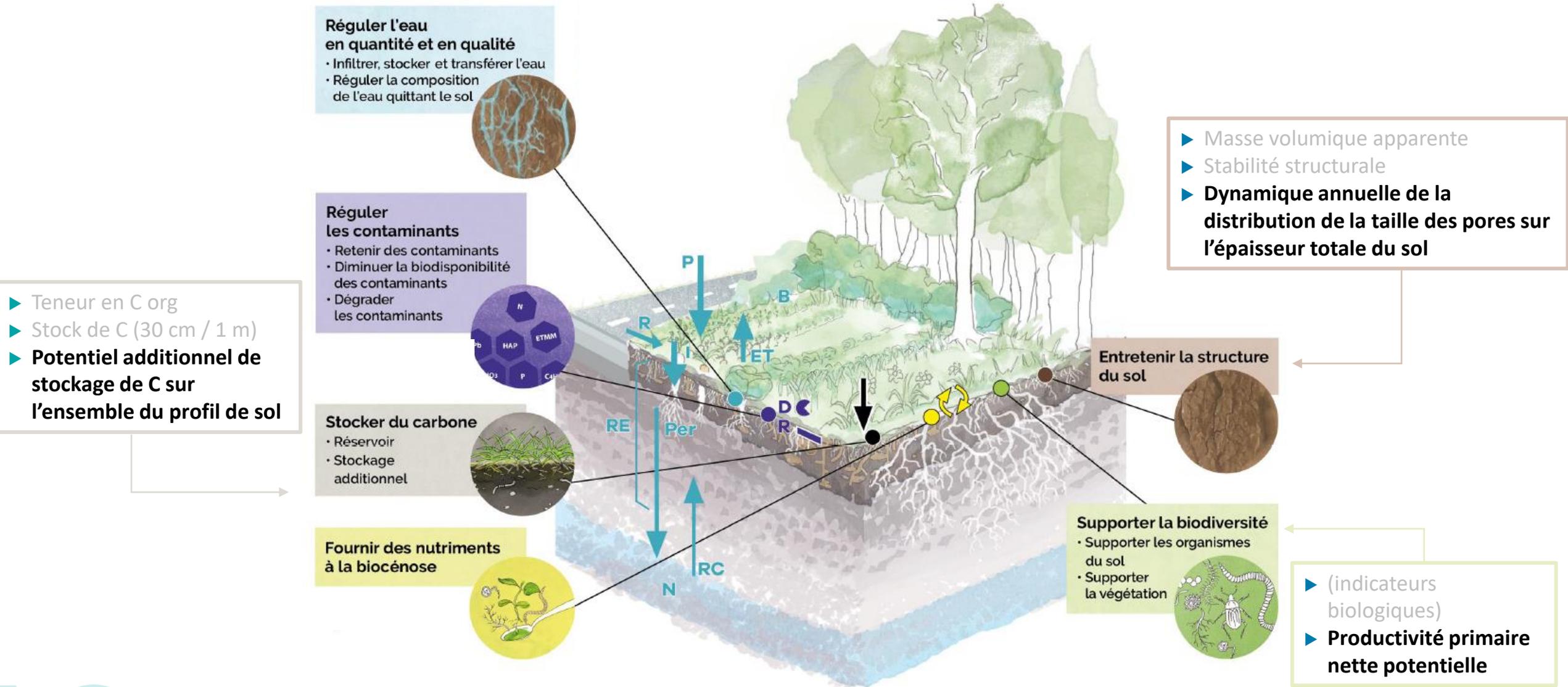
Des fonctions		Supporter la biodiversité	Stocker du carbone	Réguler les contaminants	Fournir des nutriments à la biocénose	Réguler l'eau	Entretien la structure du sol
P	Profondeur						
P	Granulométrie – Texture						
P	Teneur en éléments grossiers						
C	Conductivité électrique						
C	pH (eau)						
C	Capacité d'échange cationique (CEC)						
C	Rapport C/N						
C	Type et composition (dont C/N) de l'humus forestier						
P	Rapport Corg/Arg						
P	Fractions du carbone						
P	Fraction de carbone oxydable						
C	Teneur en carbone organique						
C	Stock de carbone (sur 30 cm)						
C	Stock de carbone (sur 1 m)						
P	Masse volumique apparente						
P	Stabilité structurale						
P	Conductivité hydraulique à saturation						
P	Réservoir en Eau Utilisable (RU) Maximum						
C	Teneur en N total						
C	Teneur en P disponible						
C	Teneur en K disponible						
C	Teneurs totales en EIMM**						
C	Teneurs partielles (extractibles) en EIMM						
C	Teneurs en polluants organiques (HAP*)						
C	Teneurs en polluants organiques (PCB*, dioxines/furanes)						
C	Teneurs en polluants organiques (pesticides et métabolites)						
B	Patio champignons/bactéries	*					
B	Abondance des lombriciens	*					
B	Diversité/groupes écologiques/fonctionnels des lombriciens	*					
B	Activités enzymatiques	*					
B	Biomasse moléculaire microbienne	*					
B	Biomasse microbienne	*					
B	Respiration basale du sol	*					
B	Potentiel de minéralisation de Net C	*					
B	Diversité des bactéries du sol	*					
B	Diversité des champignons du sol	*					
B	Abondance des enchytréides	*					
B	Abondance des nématodes	*					
B	Diversité des nématodes	*					
B	Abondance des microarthropodes	*					
B	Diversité/groupes fonctionnels des microarthropodes	*					

des indicateurs

des déterminants



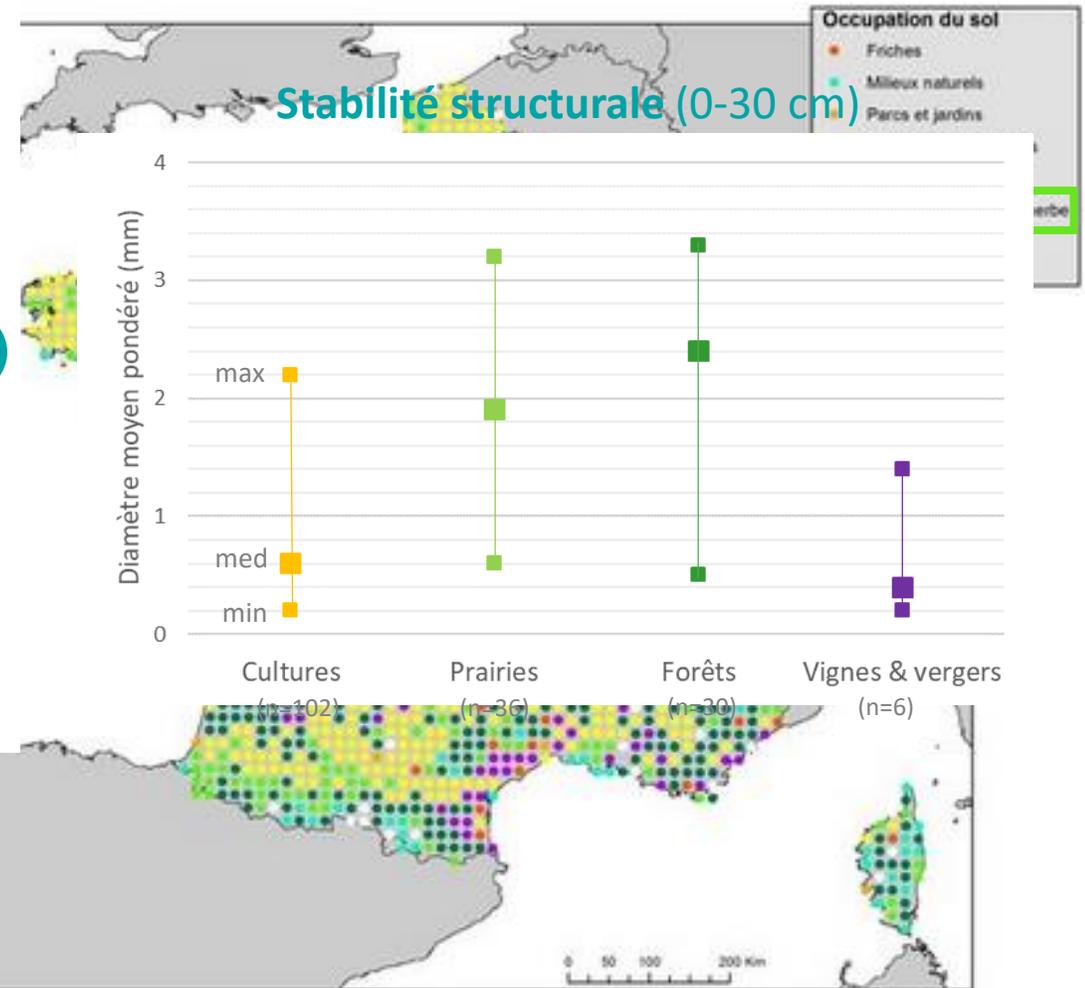
➤ Des indicateurs « idéaux » pour caractériser des fonctions



➤ Des valeurs de référence pour les indicateurs : des valeurs d'existence pour évaluer la qualité

Réseau de Mesures de la Qualité des Sols (RMQS)

Indicateur	Gamme de valeurs par occupation du sol					Références
	Successions culturales	Surfaces toujours en herbe	Surfaces boisées	Vergers et cultures pérennes arborescentes	Toutes occupations	
Profondeur	Très variable - contexte géopédoclimatique dépendant					
Taux d'érosion	non analysé dans cette étude					
Granulométrie - Texture	Très variable - contexte géopédoclimatique dépendant					
Masse volumique apparente (g/cm ³) couche 0-30 cm	n=878 Min: 0,79 Max: 1,96 Med: 1,36 Moy: 1,36	n=521 Min: 0,44 Max: 1,98 Med: 1,30 Moy: 1,29	n=672 Min: 0,48 Max: 2,05 Med: 1,24 Moy: 1,24	n=59 Min: 1,00 Max: 2,04 Med: 1,54 Moy: 1,54	n=2144 Min: 0,37 Max: 2,05 Med: 1,32 Moy: 1,31	RMQS, 1 ^{re} campagne Saby et al. (2019, 2024)
Masse volumique apparente (g/cm ³) couche 30-50 cm	n=878 Min: 0,87 Max: 2,16 Med: 1,48 Moy: 1,48	n=521 Min: 0,20 Max: 2,26 Med: 1,44 Moy: 1,43	n=672 Min: 0,51 Max: 2,34 Med: 1,38 Moy: 1,39	n=59 Min: 1,06 Max: 2,10 Med: 1,53 Moy: 1,55	n=2144 Min: 0,20 Max: 2,34 Med: 1,47 Moy: 1,46	
Teneur en éléments grossiers (%)	Très variable - contexte géopédoclimatique dépendant					
Stabilité structurale (MWD) (mm)	n=102 Min: 0,2 Max: 2,2 Med: 0,6 Moy: 0,7	n=36 Min: 0,6 Max: 3,2 Med: 1,9 Moy: 1,8	n=30 Min: 0,5 Max: 3,3 Med: 2,4 Moy: 2,2	n=6 Min: 0,5 Max: 1,4 Med: 0,4 Moy: 0,5		RMQS, 1 ^{re} campagne (174 sites) Rabot et al. (2014)
Conductivité électrique (σ) (dS/m)	(pas de données nationales disponibles)					
Conductivité hydraulique à saturation (Ks) (m/s) horizon de surface			n=86 Min: 4,09.10 ⁻⁷ Max: 1,08.10 ⁻⁴ Med: 3,57.10⁻⁵ Moy.géo: 2,47.10⁻⁵	Base de données SOLHYDRO (données acquises par INRAE / UR Sols, non publiées)		



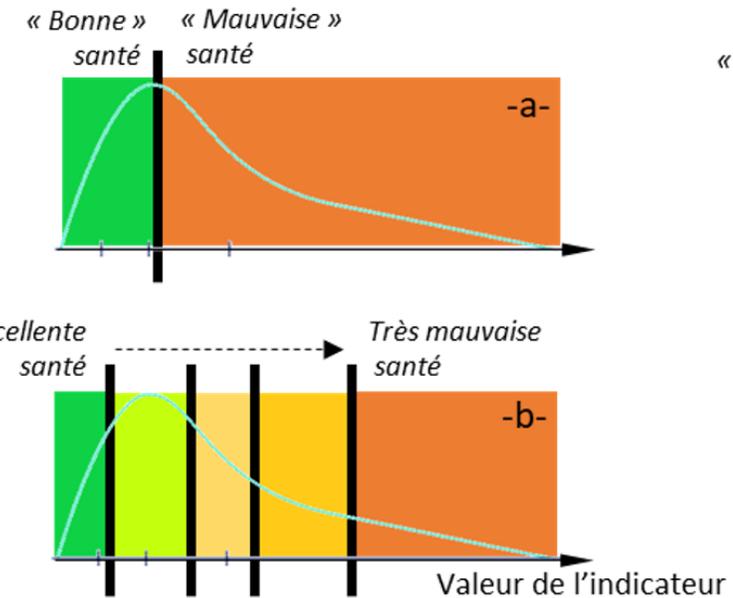
➤ Des valeurs de référence pour les indicateurs : des valeurs seuils pour évaluer la santé

Des seuils basés sur la science ou la loi

Indicateur	Usage du seuil	Nombre de classes	Classes et seuils associés					Référence
Profondeur	(sans objet)	-	dépendant du contexte pédoclimatique					
Taux d'érosion (t/ha)	Risque d'érosion	2	à fixer par chaque état-membre (valeur usuelle: Taux d'érosion < 2 t)					SMRL, 2024
Granulométrie - Texture	(sans objet)	-	dépendant du contexte pédoclimatique					
Masse volumique apparente (MV) (horizon de surface) (g/cm ³)	Risque de tassement superficiel	à fixer	à fixer par chaque état membre					SMRL, 2024
Masse volumique apparente (MV) (horizon profond) (g/cm ³)	Risque de tassement profond	4	MV < 1,2 très aéré	1,2 < MV < 1,6 normal	1,6 < MV < 1,9 dense	MV > 1,9 imperméable		EEA, 2023
	Risque de tassement profond	5	sable, sable limoneux, limon moyen sableux MV < 1,8	limon argilo-sableux, limon moyen MV < 1,75	limon, limon moyen argileux MV < 1,65	argile sableuse, argile limoneuse (35-45% argile) MV < 1,58	argile MV < 1,47	SMRL, 2024
Teneur en éléments grossiers (EG) (%)	Risque de limitation de la croissance végétale	-	pas de seuil : risque dépendant de l'usage du sol et/ou du type de végétal					
Stabilité structurale (MWD) (mm)	Risque de structure non stable	5	MWD < 0,4 : très instable	0,4 < MWD < 0,8 : instable	0,8 < MWD < 1,3 : modérément instable	1,3 < MWD < 2 : stable	MWD > 2 : très stable	Le Bissonnais, 1996
Conductivité électrique (σ) (dS/m)	Risque de limitation de la croissance végétale Qualification du niveau de salinisation	-	-					Diebolder (ed.), 1954
Conductivité hydraulique à saturation (Ks) (m/s)	Risque de ruissellement et d'érosion	-	-					
	Réduction de la capacité du sol à retenir l'eau	-	-					
	Risque de tassement profond	-	-					
Air Capacity (Air) (%)	Risque de tassement profond	-	-					
	Réduction de la capacité du sol à retenir l'eau	-	-					
Réservoir en Eau Utilisable (RU) Maximum (mm/cm)	Risque de limitation de la croissance végétale	-	-					



Des seuils basés sur des distributions de valeurs



Des propositions commerciales à valider....



INRAE

De la Qualité à la santé des sols : quels indicateurs ? (n=103)

25 juin 2025



➤ Pour conclure et aller plus loin

■ DÉFINIR LA QUALITÉ ET LA SANTÉ

▶ une **co-construction** entre parties prenantes

■ IDENTIFIER DES INDICATEURS

- ▶ Des indicateurs utiles pour mettre en œuvre la **Soil Monitoring and Resilience Law**
- ▶ Au-delà d'une liste, préciser la **finalité** et **l'indicandum**
- ▶ Les indicateurs ont une **existence socio-politique** (dépendance au sentier)
- ▶ Réfléchir à son niveau **d'opérationnalité**



Indicateurs Biologiques Opérationnels de la Santé des Sols

Bilan de l'opérationnalité des indicateurs biologiques de la santé du sol : étude IndiQuaSols

Nicolas Chemidlin Prévost-Bouré, David Montagne


 Agrocologie
UNIVERSITÉ DE BORDEAUX


 Ecologie Fonctionnelle
 et Ecotoxicologie
 des Agroécosystèmes

in Isabelle Cousin, Maylis Desrousseaux, et al. *Préserver la qualité des sols : vers un référentiel d'indicateurs. Rapport d'étude.* INRAE. 2025, 780 p.

➤ Pour en savoir plus sur cette étude



Rapport 780 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

<https://hal.inrae.fr/hal-04934694>

<https://indicateurs-qualite-sols.colloque.inrae.fr/>

Synthèse 120 pages

Résumé 12 pages

<https://hal.inrae.fr/hal-04798285>

<https://hal.inrae.fr/hal-04828558>



Merci pour votre attention !

De la qualité à la santé des sols : quels indicateurs ?

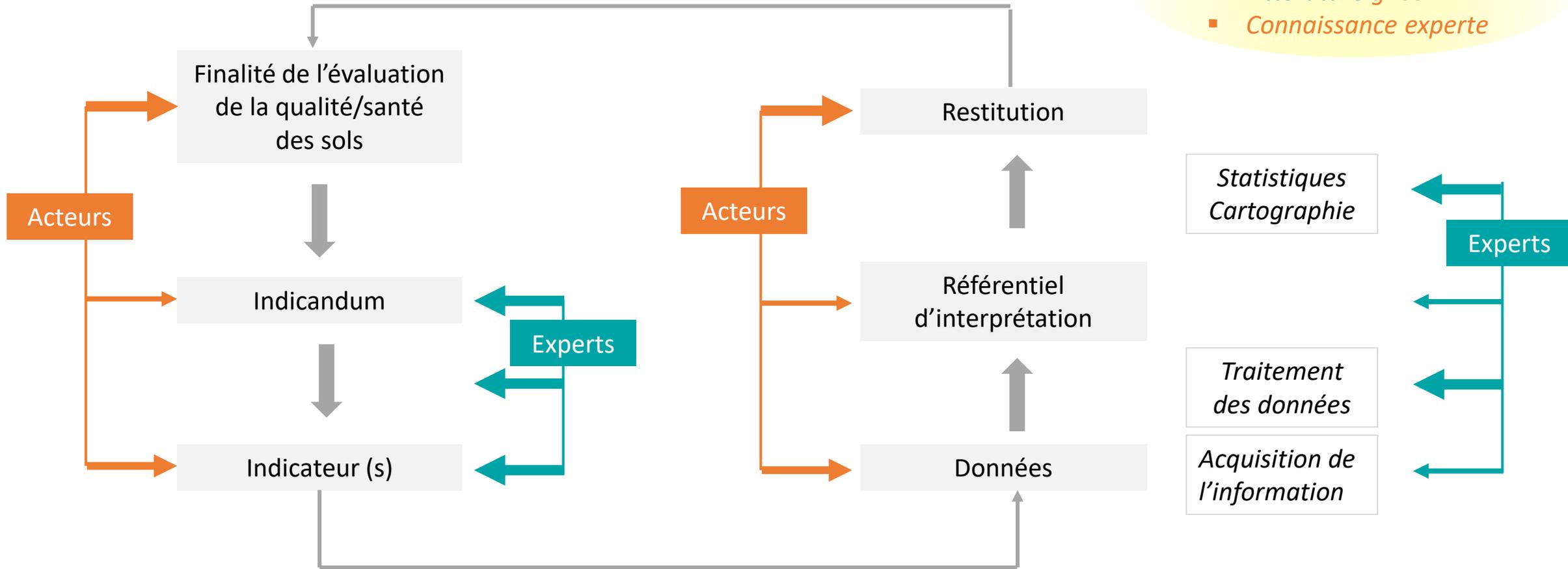


INRAE

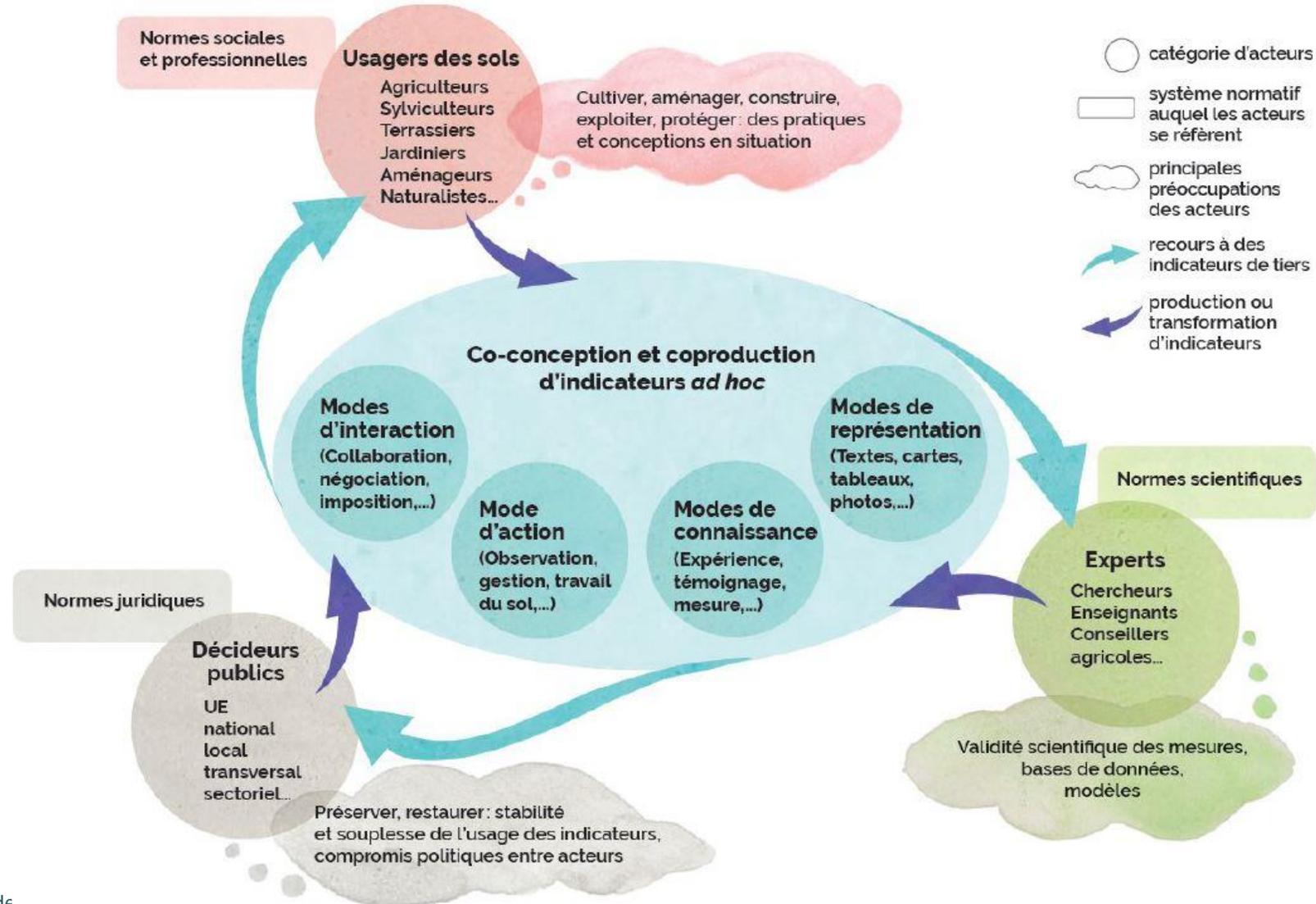
*Etude INRAE :
Préserver la Qualité des sols -
vers un référentiel d'indicateurs*

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

- *Littérature scientifique*
- *Littérature grise*
- *Connaissance experte*



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



➤ Les indicateurs scientifiques ont une existence socio-politique

L'indicateur, un **objet-frontière**, facteur de réussite :

- transversalité entre mondes sociaux (communication), avec des sens potentiellement différenciés
- structure stable permettant des reformulations selon l'évolution des objectifs.

Un indicateur qui « réussit » n'est pas nécessairement scientifiquement optimal

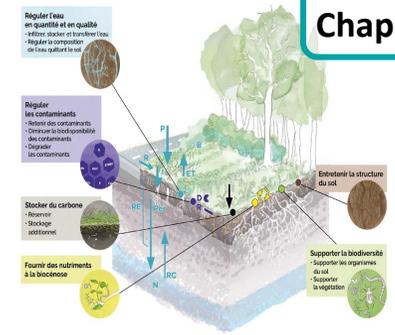
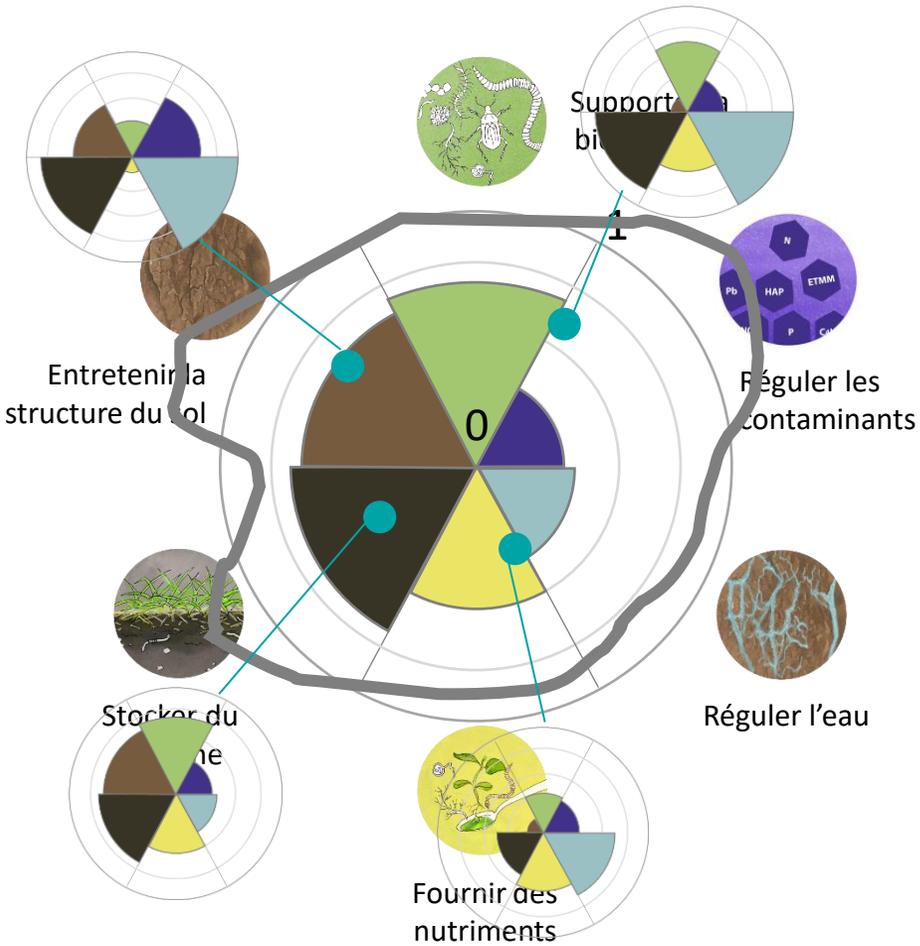
- **dépendance au sentier**

RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation)

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

➤ Evaluer la multifonctionnalité

Réaliser des **profils fonctionnels**



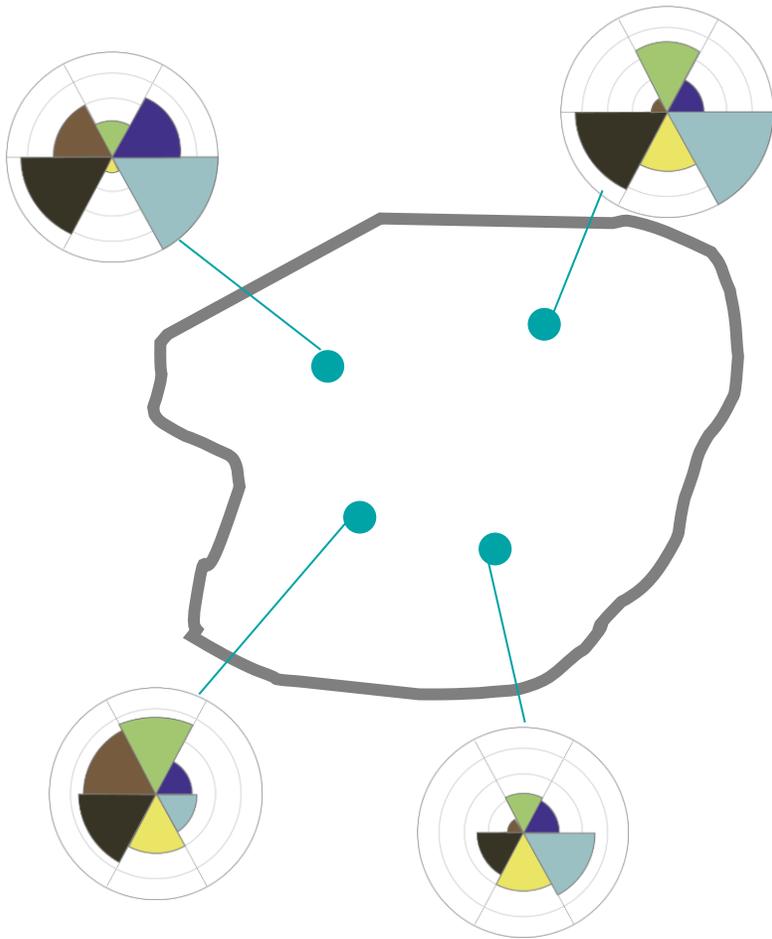
INRAE

De la Qualité à la santé des sols : quels indicateurs ? I. Cousin
25 juin 2025

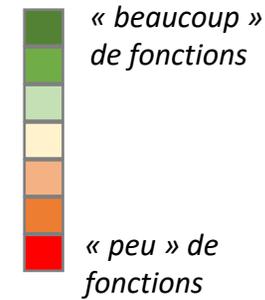
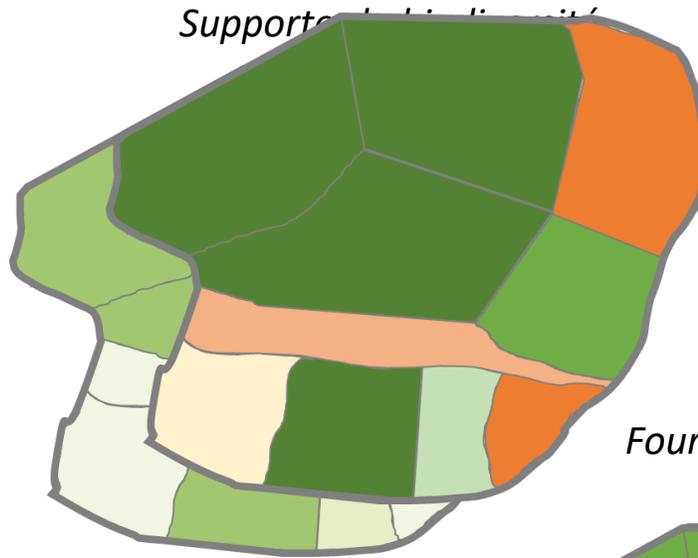


➤ Evaluer la multifonctionnalité

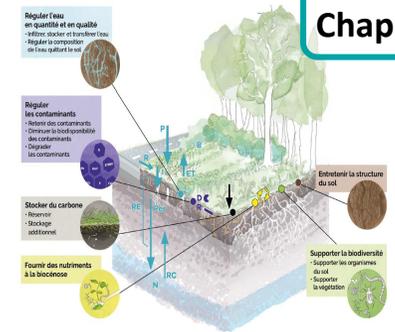
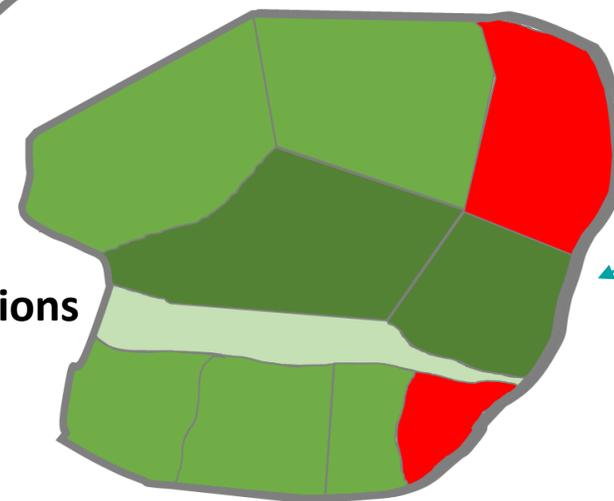
Réaliser des **profils fonctionnels**



Cumuler des fonctions...



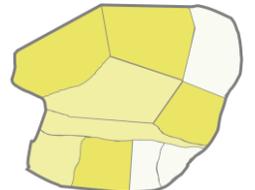
... avec des pondérations



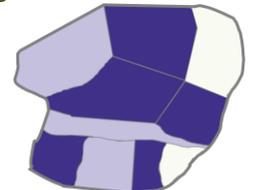
Supporter la biodiversité



Fournir des nutriments



Réguler les contaminants



Stocker du Carbone

