



# La mise en œuvre de la refunctionalisation des sols

**Samuel Coussy, ingénieur environnement**  
Unité sites et sols et sédiments pollués (DEPA/3SP), BRGM



# Les fonctions du sol?

=> Les 4 grandes familles de fonctions assurées par les sols

## Fonctions biologiques

Habitat d'espèces, connectivité écologique



## Fonctions bio-géo-chimiques

épuration, capacité à dégrader de la MO (fertilité), stock carbone, dégradation ou rétention de polluants



## Fonctions hydro-géo-morphologiques

ralentissement des ruissellements, recharge des nappes



## Fonctions support géotechnique



# La refonctionnalisation d'un sol ?

=> le renforcement, le rétablissement ou la création de la fonctionnalité générale ou spécifique du milieu/compartiment sol, en agissant sur les propriétés du sol attendu. Souvent associé avec le concept de SfN.



@AGREGE

Possible déconstruction



@BRGM



@Plantes et Cité



@Bio-TUBES



@BRGM

## Solutions fondées sur la nature

Désimpermeabilisation

Génie pédologique  
(construction/reconstitution de sol)

Techniques phytoremediation



végétalisation



@Bio-TUBES

=> SfN: actions de réhabilitation (écologique ou SSP), de gestion et/ou de préservation visant à maintenir, restaurer ou créer des écosystèmes naturels.

# Les solutions de désimperméabilisation

Retirer la ou les couches empêchant l'infiltration de l'eau visant à améliorer le cycle de l'eau. Couplée à une végétalisation, elle permet également d'améliorer la qualité de vie localement.

-> places, friches, parkings, trottoirs, ronds points, abords de cours d'eau, chemins cyclables, etc.

Exemple Programme de débitumisation à Caen



@France bleu

Plan de végétalisation des cours d'école à Lyon



@ville de Lyon

Projet OASIS à Paris



@ville de Paris

Projet ville perméable Grand Lyon



@Grand Lyon

## Enjeux

- Favoriser l'infiltration et/ou l'évapotranspiration de l'eau
- Lutter contre inondations (ruissellement)
- Lutter contre îlots chaleur urbain

## Points d'attention

- Manque de connaissance et maîtrise des solutions
- Acceptation sociétale
- Réglementation

## Ex. de projets de R&D en cours

Dessert (2021-2024)

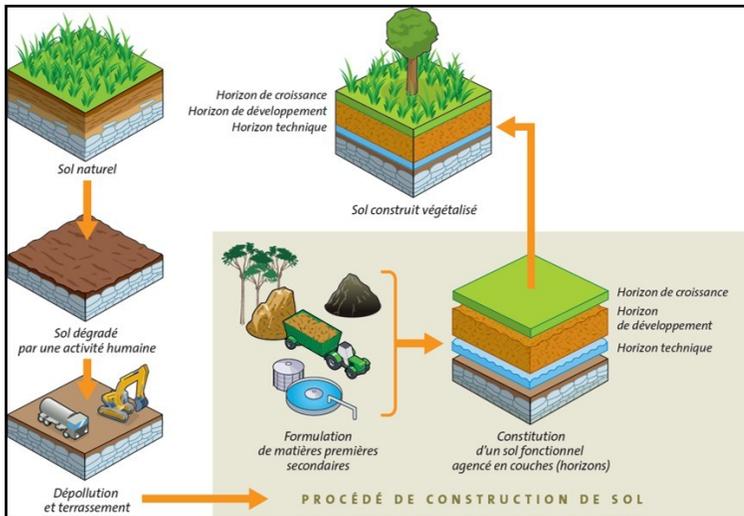
Désiville (en cours)

# Les solutions de construction et reconstitution de sols

La **construction de sol** : création d'un nouveau sol assurant un niveau de fonctionnalité élevée mais différent par rapport à l'ancien sol en termes de structure et de fonction

La **reconstitution de sol** : rétablissement par un apport unique en quantité importante de produits organiques résiduaux au sol en place, de certaines fonctions essentielles assurées antérieurement par le sol naturel initial.

Exemple de construction de sols fertiles et pérennes à l'aide de déchets (projet AGREGE)



Procédé de construction de sol (Brevet INRA/INPL/TVD) pour la reconquête des milieux dégradés.

## Enjeux

- Besoin en terres végétales
- Favoriser l'économie circulaire (déchets et sous produits)
- Valorisation des terres excavées
- Préserver les espaces agricoles

## Points d'attention

- Filière en cours de mise en place
- Réglementation vient d'évoluer
- méthodes de suivi et d'évaluation des sols reconstruits

## Autres projets de R&D

SITERRE (Procédé de construction de Sols à partir de matériaux innovants en substitution à la TERRE végétale et aux granulats de carrière)

BIOTUBES (BioTechnosols urbains en faveur de la biodiversité et des services écosystémiques)

# Construction de sols (projet AGREGE)



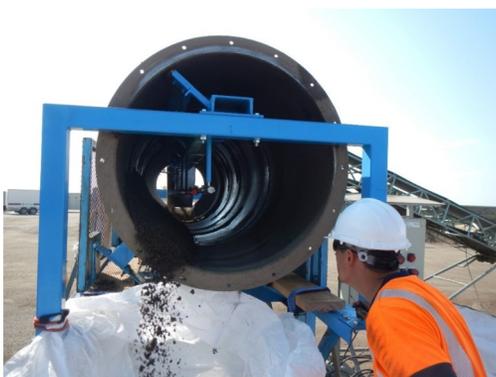
*Mélange des matériaux*



*Homogénéisation*



*Mise en BB*



*Granulation*



*Mise en place*



*Semi (150 kg/ha)*

## L'APPROCHE DÉVELOPPÉE DANS AGREGE REPOSE SUR LES PRINCIPES SUIVANTS :

- La recherche d'une **correction de la texture** des terres disponibles sur site,
- La recherche d'une **correction du taux de matière organique**,
- La recherche d'une **correction de la minéralogie**, avec un focus réalisé sur le **type d'argiles** et les matériaux carbonates,
- La recherche d'une **structuration des mélanges** réalisées avec ou sans **superpositions de couches (horizons)** de natures différentes afin de donner au futur sol la porosité nécessaire aux passages de l'eau, de l'air et des racines.

**Objectif: construire un sol (multi)fonctionnel**

# Construction de sol – combinaison génie pédologique et génie écologique (projet Bio-Tubes)

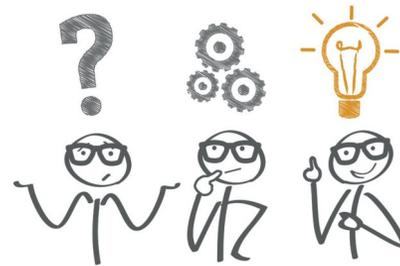


# Suivre l'efficacité des solutions de refonctionnalisation de sol



Les solutions fondées sur la Nature (SfN)

Comment accompagner les porteurs de projet en charge de la réhabilitation d'un site dégradé / pollué à mettre en œuvre des SfN qui encouragent de refonctionnaliser un sol et à vérifier leur efficacité ?

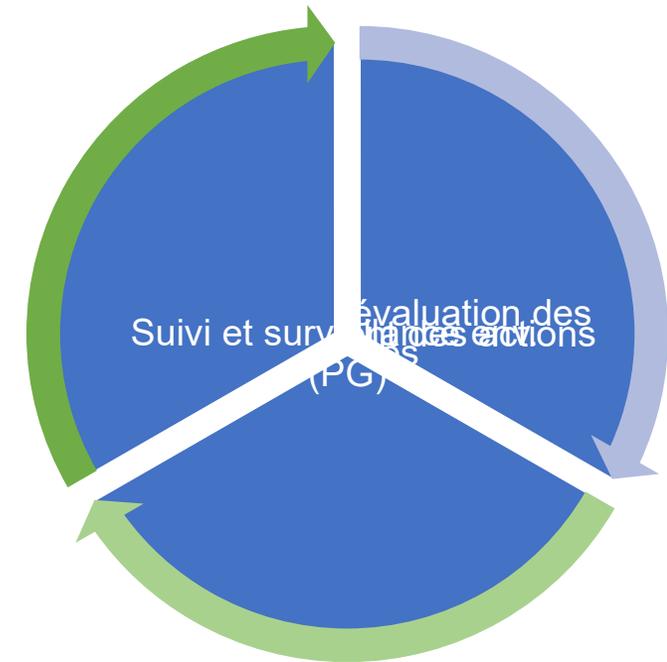


# Suivre l'efficacité des solutions de refunctionalisation de sol

## Une proposition

- En contexte de réhabilitation de site avec sol dégradé, disposer d'un outil simple et opérationnel :
- Prenant en compte des **usages actuels et futurs** et des **enjeux**
- Orientant sur **les SfN à privilégier** selon les enjeux auxquels le porteur de projet est confronté
- Proposant des **les indicateurs** à suivre pour vérifier l'efficacité des mesures de « réhabilitation écologique » mises en œuvre (intégrant la refunctionalisation du sol)

## Projet de réhabilitation écologique

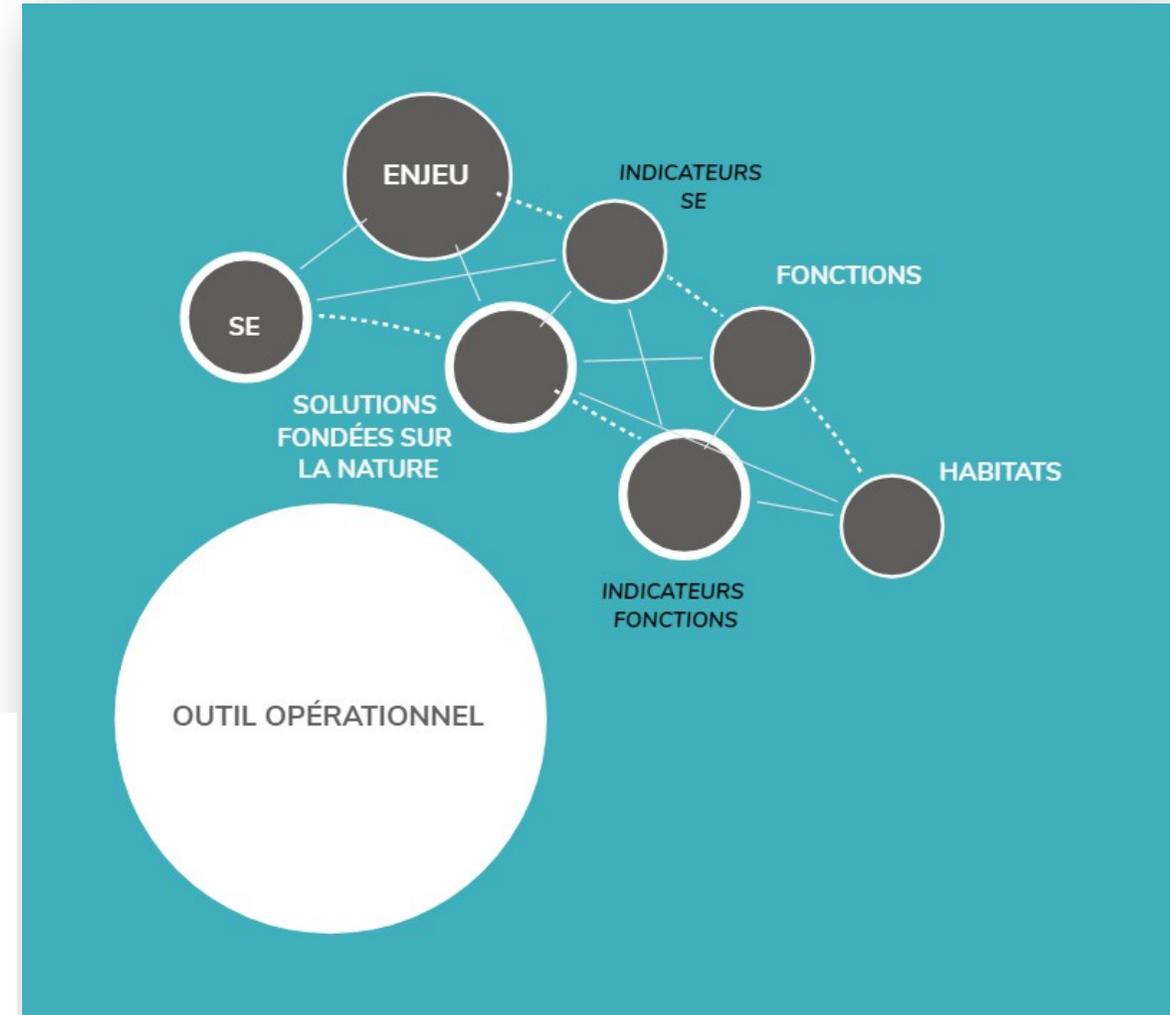


# Suivre l'efficacité des solutions de refonctionnalisation de sol

## Un cadre méthodologique

- Typologie par « variable »
- Construction de tableaux d'indicateurs
- Matrices d'interrelation pour établir les liens entre variable et entre variable et indicateur

The image shows a stack of four matrices: 'Matrice Enjeux - SE', 'Matrice SE - SFN', 'Matrice SE - Fonctions', and 'Matrice SFN - Habitats'. The 'Matrice SFN - Habitats' is the most detailed, showing a grid of relationships between various habitat types (e.g., 'Espaces boisés', 'Espaces verts', 'Parcs, squares et aires de jeu') and a list of services (e.g., 'Services écosystémiques', 'Services de régulation', 'Services de soutien', 'Services culturels'). 'X' marks indicate the presence of a relationship between a habitat and a service.



# Suivre l'efficacité des solutions de refunctionalisation de sol

Onglets où données d'entrée à renseigner

**Questions relatives à la condition actuelle du site**

§ Le contexte dans lequel s'inscrit le site est-il urbain (plutôt que rural) ? *Informations complémentaires*

Oui  
 Non

← Renseigner le contexte du site t0 et t1

§ Quels sont les habitats observés sur le site avant réaménagement ? *Informations complémentaires*

Espaces végétés  
 Espaces végétés  
 Milieux aquatiques  
 Milieux cultivés  
 Linéaires végétés  
 Surfaces majoritairement bâties  
 Surfaces majoritairement agricoles  
 Terrains vagues

← Sélectionner les enjeux (précochés)

Les cases ont été pré-cochées en fonction de vos réponses aux questions précédentes.

| Catégorie  | Enjeu  |
|--|--|
|  CLIMAT | <input checked="" type="checkbox"/> Atténuation du changement climatique |
|  | <input type="checkbox"/> Adaptation au changement climatique             |
|  | <input type="checkbox"/> Gestion des eaux urbaines et de leur qualité    |

← Sélectionner les SE (précochés)

Les cases ont été pré-cochées en fonction de vos réponses

| Catégorie de Services Ecosystémiques  | Enjeu  |
|---|--|
|  ENVIRONNEMENT               | <input type="checkbox"/> Produits de l'agriculture   |
|   | <input type="checkbox"/> Produits de la cueillette   |
|  RESSOURCES                  | <input type="checkbox"/> Apiculture                  |
|   | <input type="checkbox"/> Régulation du climat global |
|   | <input type="checkbox"/> Régulation du climat global |
|  SANTE PUBLIQUE ET BIEN-ETRE | <input type="checkbox"/> Régulation du climat global |
|   | <input type="checkbox"/> Régulation du climat global |

← Sélectionner les SFN (précochés)

Les cases ont été pré-cochées en fonction de vos réponses aux questions précédentes.

**Solutions liées à la planification du territoire**

| SOUS-TYPE                                | CATEGORIE | INTITULE DE LA SFN   |
|--|-----------|--|
| Stratégies d'aménagement urbain          |           | <input checked="" type="checkbox"/> Maintien et amélioration de la continuité avec le réseau écologique            |
|  |           | <input checked="" type="checkbox"/> Prise en compte de la répartition des espaces verts publics à travers la ville |
|  |           | <input checked="" type="checkbox"/> Outils de planification contrôlant l'expansion urbaine                         |
| Stratégies de protection et conservation |           | <input checked="" type="checkbox"/> Restriction ou interdiction d'accès à un espace donné                          |
|  |           | <input checked="" type="checkbox"/> Restriction ou interdiction de certains usages et pratiques                    |

**Solutions de gestion**

| SOUS-TYPE                         | CATEGORIE                    | INTITULE DE LA SFN  |
|-----------------------------------|------------------------------|---|
| Gestion des espaces verts urbains | Intervention humaine directe | <input checked="" type="checkbox"/> Mise en œuvre d'une fertilisation raisonnée et utilisation de fertilisants organiques |
|                                   |                              | <input checked="" type="checkbox"/> Ajout de paillage   |
|                                   |                              | <input checked="" type="checkbox"/> Gestion différenciée  |
|                                   |                              | <input checked="" type="checkbox"/> Gestion intégrée des adventices et des ravageurs                                      |
|                                   |                              | <input checked="" type="checkbox"/> Utilisation d'animaux de pâturage   |
| Utilisation de la faune           |                              | <input checked="" type="checkbox"/> Hôtel à insectes  |
|                                   |                              | <input checked="" type="checkbox"/> Ruches  |

# Suivre l'efficacité des solutions de refunctionalisation de sol

Onglets de résultats : proposition d'indicateurs pour suivre l'efficacité de la refunctionalisation et services rendu par le projet de SFN

| 8 Fonctions écologiques et 70 indicateurs de fonctions associés |   |  | 13 Services écosystémiques et 34 indicateurs de services associés |   |   |
|---|---|--|---|---|---|
| Service écosystémique / fonction écologique associée            | Objectif visé   | Indicateur de fonction   | Service écosystémique   | Indicateur de service   |   |
| Produits de l'agriculture                                       | Rétention et fourniture des nutriments pour les organismes du sol et les végétaux       | Teneur en carbone organique labile<br>Teneur en phosphore dans le sol<br>Teneur en azote dans le sol<br>Minéralisation de l'azote dans le sol<br>Taux de nitrification (transformation de l'ammonium issu de la dégradation de la matière organique en nitrate, mobilisable par les plantes)<br>Fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses<br>Abondance des gènes fonctionnels dans le sol liés au cycle du carbone et de l'azote (fonctionnel/fonctionnel d'un seul)<br>Activité enzymatique du sol liée au cycle du carbone et de l'azote<br>Évaluation de la valeur agronomique du sol sur la base d'indicateurs de routine<br>Caractérisation pédologique du sol pour évaluer sa qualité agronomique | Amenités paysagères   | Taux de satisfaction de la population par rapport aux espaces publics urbains (en % de la population ayant participé à l'enquête) |   |
|   | Rétention, circulation et infiltration de l'eau   | Capacité au champ<br>Réserve utile du sol  |   | Apiculture  | Nombre de ruches installées sur le site (en nombre de ruches)<br>Qualité du miel par la concentration en hydroxyméthylfurural (HMF) (en mg/kg de miel)<br>Volume de miel et autres produits issus de la ruche (en kg par ruche et par an)<br>Diversité spécifique du site par l'indice de Shannon (sans unité)  |
| Apiculture  | Habitats d'espèces  | Potential d'accueil de la végétation pour les pollinisateurs<br>Biomasse aérienne et souterraine de la végétation (g C/ha)<br>Indicateur "Surface terrière"  | Éléments protégés des écosystèmes et biodiversité ordinaire       |   | Nombre de faunes d'espèces associées envahissantes (sur un couvert en m <sup>2</sup> )<br>Potential des zones susceptibles d'accueillir la biodiversité (en ha)<br>Proportion d'espace vert urbain (en % de la surface totale du site)<br>Richesse en faune et flore patrimoniales et faunaires (en nombre d'espèces)<br>Nombre de événements de sensibilisation du public tenus sur le site par an                         |
| Régulation du climat global                                     | Stockage, recyclage et transformation des matières organiques (carbone)                 | Épaisseur de l'horizon pédologique humifère en surface et en profondeur (en cm)<br>Teneur en stock de carbone dans le sol (g C/g sol ou kg C/ha)   |   | Intérêt éducatif et pédagogique   | Nombre de personnes incluant les enfants et adultes ayant bénéficié d'une visite guidée documentée<br>Nombre de projets de recherche menés sur le site<br>Accessibilité (en km, en minute)<br>Connectivité du réseau urbain mesurée par une estimation du nombre d'habitants habitant à proximité des zones vertes et zones récréatives mesurées au nombre d'habitants total (en %)<br>Nombre de visites sur le site par an |
|   | Régulation du climat local  | Contrôle de la contribution d'un habitat au pluvial habitant à abaisser la température en ville (état de fraîcheur)<br>Contrôle de la contribution d'un habitat au pluvial habitant à abaisser la température en ville (état de fraîcheur)   | Intérêt récréatif, de loisir                                      |   | Surface d'espace vert par habitant (en m <sup>2</sup> par habitant)<br>Surface d'espace vert par habitant (en m <sup>2</sup> par habitant)  |
| Régulation de la qualité de l'air                               | Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau) | Épaisseur de l'horizon pédologique humifère en surface (en cm)<br>Teneur en carbone organique labile<br>Teneur en stock de carbone dans le sol (g C/g sol ou kg C/ha)  |   | Produits de la cueillette   | Volume de produits issus de la cueillette cueillies sur le site (en kg par an)<br>Nombre de bûches sur le site (par espèce et par ha)<br>Rendement par type de culture horticole cueillette (en t/ha et par an)   |
|   | Rétention des sédiments   | Taux de recouvrement de la végétation sur le site (%)<br>Teneur en phosphore dans le sol<br>Teneur en azote dans le sol<br>Teneur en phosphore dans le sol de surface<br>Teneur en azote dans le sol de surface<br>Indicateur floristique de fertilité du sol ou d'eutrophie<br>Indicateur "Odenator"  | Produits de l'agriculture   |   | Rendement des cultures fourragères du site (en t/ha et par an)<br>Rendement des cultures fourragères du site (en t/ha et par an)<br>Superficie des cultures fourragères sur le site (en ha)<br>Superficie des cultures vivrières sur le site (en ha)  |
| Régulation de la qualité de l'eau                               | Rétention et fourniture des nutriments pour les organismes du sol et les végétaux       | Indice de verdoyement<br>Densité d'arbres<br>Indice de canopée<br>Suivi géométrique et thermique de l'air<br>Analyse du pollen transporté par les abeilles pour détecter d'éventuels polluants du site (embryonaires, HAP et PCB)<br>Fraction volatile des polluants   |   | Régulation de la qualité de l'air   | Requêtes par l'indice AQI (ou AQIP) disponible dans l'application (sans unité)<br>Concentration de l'air en particules et polluants atmosphériques (particules PM10 et 2,5, dioxyde d'azote, ozone, dioxyde de soufre) (en concentration en µg/m <sup>3</sup> , date)   |
|   | Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau) | Limitation du transfert de polluants vers les réseaux hydrographiques<br>Fraction mobile des polluants   | Régulation de la qualité de l'eau                                 |   | Qualité physico-chimique et biologique des eaux superficielles et souterraines en amont et en aval du site (concentration en polluants)<br>Capacité d'abatement de la pollution du site comparée à un site localisé à proximité (concentration en polluants par ha)   |
| Régulation de la qualité de l'eau                               | Rétention et fourniture des nutriments pour les organismes du sol et les végétaux       | Épaisseur de l'horizon pédologique humifère en surface (en cm)<br>Teneur en carbone organique labile<br>Teneur en stock de carbone dans le sol (g C/g sol ou kg C/ha)  |   | Régulation de la qualité des sols   | Qualité physico-chimique et biologique du sol sur le site comparée à un site localisé à proximité (parazifé en %, réserve utile en %, taux de MO en %, carbone actif en %, concentration en N, K, Mg, Ca, manganèse, cuivre, zinc, sélénium, etc.)<br>Niveau sonore moyen sur une période déterminée : Le jour, La nuit, Les week-end (en dB)   |
|   | Rétention, circulation et infiltration de l'eau   | Favoriser l'infiltration<br>Taux d'infiltration de l'eau dans le sol<br>Mesure de la respiration du sol témoin d'une activité de minéralisation du sol et de sa "capacité" labile<br>Densité et biodiversité des vers de terre et enchytréides<br>Taux de Bactériologie  | Régulation des nuisances sonores                                  |   | Présence de barrières végétales permettant de réduire la pollution sonore (en mètre linéaire d'arbres, en ha d'espace vert)<br>Capacité de stockage de CO2 du milieu (en tCO2e par ha de boisement)<br>Superficie du milieu stockant du carbone (en ha de boisement)  |
| Régulation de la qualité de l'eau                               | Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau) | Risques de sol<br>Fraction mobile des polluants  |   | Régulation du climat global   | Températures minimales, moyennes et maximales pour chaque saison (C)<br>Indicateur "Zone Climatique Locale"   |
|   | Stockage, recyclage et transformation des matières organiques (carbone)                 | Épaisseur de l'horizon pédologique humifère en surface (en cm)<br>Teneur en carbone organique labile<br>Teneur en stock de carbone dans le sol (g C/g sol ou kg C/ha)  | Régulation du climat local  |   |   |
| Rétention, circulation et infiltration de l'eau                 | Favoriser l'infiltration  | Taux d'infiltration de l'eau dans le sol<br>Mesure de la respiration du sol témoin d'une activité de minéralisation du sol et de sa "capacité" labile<br>Densité et biodiversité des vers de terre et enchytréides<br>Taux de Bactériologie  |   |   |   |

# Suivre l'efficacité des solutions de refonctionnalisation de sol

## Pour résumer le Prototype d'outil RECORD V2.0

### A quoi sert-il ?

- Orienter le porteur de projet sur une liste de solutions fondées à la nature adaptées aux enjeux du site
- Orienter le porteur de projet sur une liste d'indicateurs de SE et de fonctions pour vérifier l'atteinte des objectifs

### A qui s'adresse t'il ?

- Tout porteur de projet d'aménagement et/ou de réhabilitation écologique (privé, public)

### A quoi ne sert-il pas ?

- L'outil ne permet pas pour l'instant de comparer en direct deux scénarios
- Il n'aboutit pas une analyse cout-bénéfice de chaque scénario

### Limites et perspectives

- Pas encore testé sur des projets d'aménagement réels (séminaire d'acculturation avec adhérents RECORD en 2021)
- Mises à jour en cours sur onglet contexte et choix des indicateurs (projet RECORD 3)



# Merci de votre attention

Pour plus d'information sur les solutions de re-fonctionalisation :  
état de l'art du projet R&D franco-wallon SOILval  
(<https://www.soilver.eu/news/project-soilval-recognising-soil-values>)

Contact : [s.coussy@brgm.fr](mailto:s.coussy@brgm.fr)