



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 refunctionalisation 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.

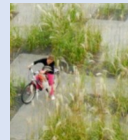


@AGREGE

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)

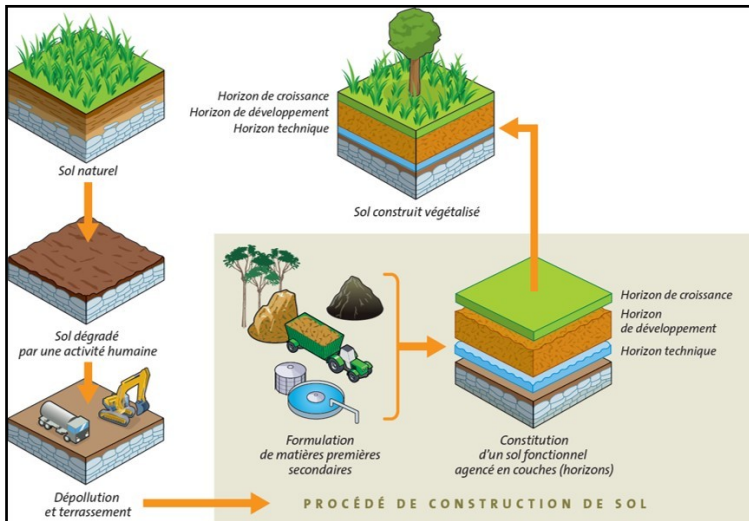
Désiville (en cours)

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 résiduels 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)

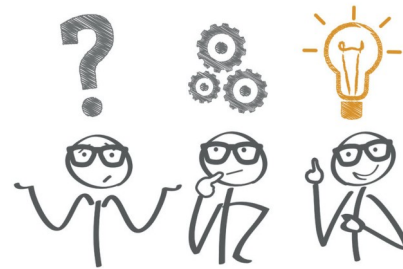


Suivre l'efficacité des solutions de refonctionnalisation de sol



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 ?

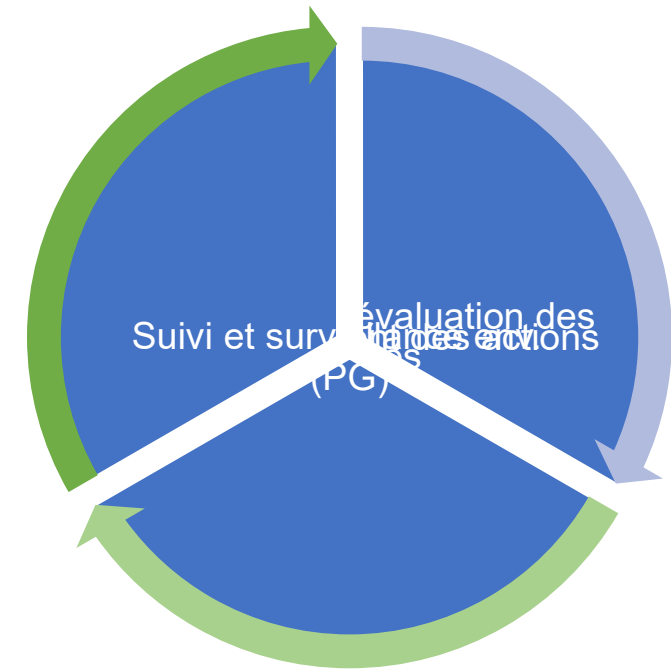


Suivre l'efficacité des solutions de refunctionalisation de sol

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

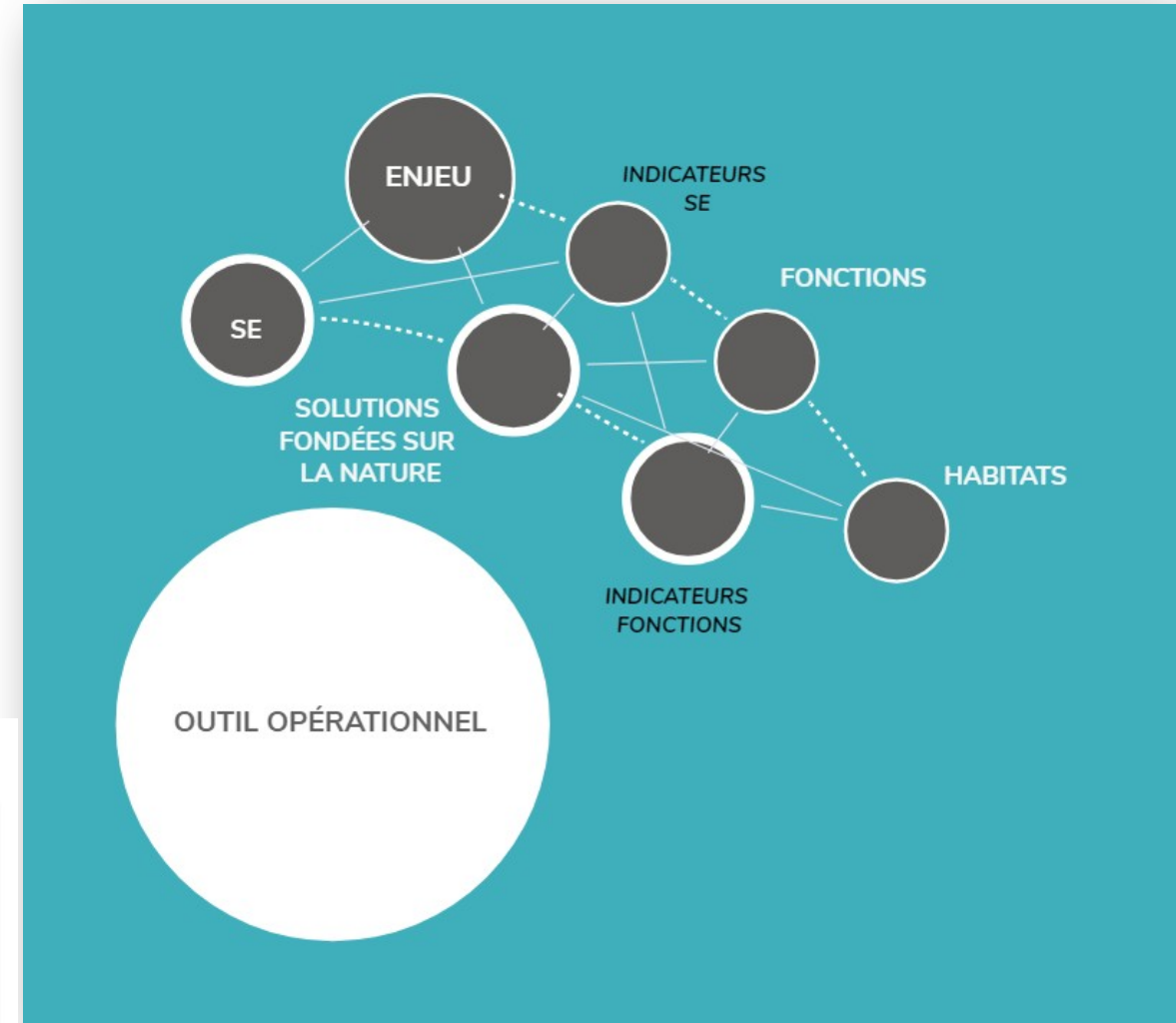


Suivre l'efficacité des solutions de refonctionnalisation de sol

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 20 services (e.g., 'Services de régulation climatique', 'Services de régulation hydrique'). 'X' marks indicate the presence of a service for a given habitat type.



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
 BIENS issus des écosystèmes	<input type="checkbox"/> Produits de l'agriculture
	<input type="checkbox"/> Produits de la cueillette
 Apiculture	<input type="checkbox"/> Apiculture
	<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	Évaluer la qualité agronomique des sols	Teneur en carbone organique labile	Teneur en phosphore dans le sol Teneur en azote dans le sol Minéralisation de l'azote dans le sol Taux de nitrification (transformation de l'ammonium issu de la dégradation de la matière organique en nitrate, mobilisable par les plantes) Fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses Abondance des gènes fonctionnels dans le sol liés au cycle du carbone et de l'azote (fonctionnel/fonctionnel d'un seul) Activité enzymatique du sol liée au cycle du carbone et de l'azote Évaluation de la valeur agronomique des sols à l'aide d'indicateurs de routine Caractérisation pédologique des sols pour évaluer la qualité agronomique	Aménités paysagères Taux de satisfaction de la population par rapport aux espaces publics urbains (en % de la population ayant participé à l'enquête) Nombre de ruches installées sur le site (en nombre de ruches) Qualité du miel par la concentration en hydroxyméthylfurural (HMF) (en g par kg de miel) Volume de miel et autres produits issus de la ruche (en kg par ruche et par an) Diversité spécifique des sites par l'indice de Shannon (sans unité) Nombre de faunes d'espèces associées envahissantes (sur un couvert en m ²) Potentiel des zones susceptibles d'accueillir la biodiversité (en ha) Proportion d'espace vert urbain (en % de la surface totale des sites) Richesse en faune et flore patrimoniales et faunardinaires (en nombre d'espèces) Nombre de événements de sensibilisation du public tenus sur le site par an Nombre de personnes incluant les enfants et adultes ayant bénéficié d'une visite guidée documentée Nombre de projets de recherche menés sur le site Accessibilité (en km, en minute) Connexité 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 %) Nombre de visites sur le site par an Surface d'espace vert par habitant (en m ² par habitant) Valeur de produits issus de la cueillette cueillie sur le site (en kg par an) Nombre de bêtes sur le site (par espèce et par ha) Rendement par type de culture hors cueillette (en t/ha et par an) Rendement de l'élevage par type de produit comme le viande, le lait, etc. (en t/ha et par an) Rendement des cultures fourragères des sites (en t/ha et par an) Superficie des cultures fourragères sur le site (en ha) Superficie des cultures vivrières sur le site (en ha) Acquisition par l'indice ATMO14 disponible dans l'équation (sans unité) Concentration de l'air en particules et polluants atmosphériques (pour les PM10 et 2,5, dioxyde d'azote, ozone, dioxyde de soufre) (en concentration en µg/m ³ , date) Qualité physico-chimique et biologique des eaux superficielles et souterraines en amont et en aval des sites (concentration en polluants) Capacité d'abatement de la pollution des sites comparée à un site localisé à proximité (concentration en polluants par ha) Qualité physico-chimique et biologique des eaux sur le site comparée à un site localisé à proximité (parazifé en %, réserve utile en %, taux de MO en %, carbone actif en mm, concentration en N, K, Mg, Ca, minéraux, métaux, en mg/L, etc.) Niveau sonore moyen sur une période déterminée : Le jour, Le soir, La nuit (en dB) Présence de barrières végétales permettant de réduire la pollution sonore (en mètre linéaire d'arbres, en ha d'espace vert) Capacité de stockage de CO2 du milieu (en tCO2e par ha de biomasse) Superficie du milieu stockant du carbone (en ha de biomasse) Températures minimales, moyennes et maximales pour chaque saison (C) Indicateur "Zone Climatique Locale"				
			Rétention, circulation et infiltration de l'eau			Capacité au champ Réserve utile des sols Évaluer la capacité d'accueil des milieux pour les abeilles	Potentiel d'accueil de la végétation pour les pollinisateurs Biomasse aérienne et souterraine de la végétation (g C/ha) Indicateur "Surface terrière" Indicateur de structure de la végétation (couvert végétal 2i)	Épaisseur de l'horizon pédologique humifère en surface et en fond (en cm) Teneur en stock de carbone dans le sol (g C/g sol ou kg C/ha)	
Apiculture	Habitats d'espèces	Attirer l'irrigation Avoir une réserve en eau disponible pour les plantes Évaluer la capacité d'accueil des milieux pour les abeilles	Indice de verdoyement Densité d'arbres Indice de canopée Suivi hygrométrique et thermique de l'air			Analyse du pollen transporté par les abeilles pour détecter d'éventuels polluants du site (embryons, HAP, etc.) Fraction volatile des pollens	Produits de la cueillette Rendement de l'élevage par type de produit comme le viande, le lait, etc. (en t/ha et par an) Rendement des cultures fourragères des sites (en t/ha et par an) Superficie des cultures fourragères sur le site (en ha) Superficie des cultures vivrières sur le site (en ha)		
Régulation du climat global	Stockage, recyclage et transformation des matières organiques (carbone)	Contrôle du stock de carbone dans la végétation	Contrôle la contribution d'un habitat ou plusieurs habitats à abaisser la température en ville (état de fraîcheur) Limiter le transfert des polluants vers l'air			Taux de recouvrement de la végétation sur le site (%) Teneur en phosphore dans le sol Teneur en azote dans le sol Teneur en phosphore dans les eaux de surface Teneur en azote dans les eaux de surface Indicateur floristique de fertilité des sols ou d'eutrophilie Indicateur "Odenator"	Régulation de la qualité de l'air Acquisition par l'indice ATMO14 disponible dans l'équation (sans unité) Concentration de l'air en particules et polluants atmosphériques (pour les PM10 et 2,5, dioxyde d'azote, ozone, dioxyde de soufre) (en concentration en µg/m ³ , date) Qualité physico-chimique et biologique des eaux superficielles et souterraines en amont et en aval des sites (concentration en polluants) Capacité d'abatement de la pollution des sites comparée à un site localisé à proximité (concentration en polluants par ha) Qualité physico-chimique et biologique des eaux sur le site comparée à un site localisé à proximité (parazifé en %, réserve utile en %, taux de MO en %, carbone actif en mm, concentration en N, K, Mg, Ca, minéraux, métaux, en mg/L, etc.) Niveau sonore moyen sur une période déterminée : Le jour, Le soir, La nuit (en dB)		
Régulation du climat local	Contrôle de la composition chimique de l'atmosphère et contribution aux processus climatiques (température, hygrométrie)	Contrôle la contribution d'un habitat ou plusieurs habitats à abaisser la température en ville (état de fraîcheur)	Suivi hygrométrique et thermique de l'air Analyse du pollen transporté par les abeilles pour détecter d'éventuels polluants du site (embryons, HAP, etc.) Fraction volatile des pollens			Régulation de la qualité de l'eau Qualité physico-chimique et biologique des eaux superficielles et souterraines en amont et en aval des sites (concentration en polluants) Capacité d'abatement de la pollution des sites comparée à un site localisé à proximité (concentration en polluants par ha) Qualité physico-chimique et biologique des eaux sur le site comparée à un site localisé à proximité (parazifé en %, réserve utile en %, taux de MO en %, carbone actif en mm, concentration en N, K, Mg, Ca, minéraux, métaux, en mg/L, etc.) Niveau sonore moyen sur une période déterminée : Le jour, Le soir, La nuit (en dB)			
Régulation de la qualité de l'air	Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau)	Limiter le transfert des polluants vers l'air Favoriser la rétention des sédiments et des nutriments	Taux de recouvrement de la végétation sur le site (%) Teneur en phosphore dans le sol Teneur en azote dans le sol Teneur en phosphore dans les eaux de surface Teneur en azote dans les eaux de surface Indicateur floristique de fertilité des sols ou d'eutrophilie Indicateur "Odenator"			Régulation des nuisances sonores Présence de barrières végétales permettant de réduire la pollution sonore (en mètre linéaire d'arbres, en ha d'espace vert) Capacité de stockage de CO2 du milieu (en tCO2e par ha de biomasse) Superficie du milieu stockant du carbone (en ha de biomasse) Températures minimales, moyennes et maximales pour chaque saison (C) Indicateur "Zone Climatique Locale"			
Régulation de la qualité de l'eau	Rétention et fourniture des nutriments pour les organismes du sol et les végétaux	Évaluer les risques d'eutrophication	Teneur en phosphore dans le sol Teneur en azote dans le sol Teneur en phosphore dans les eaux de surface Teneur en azote dans les eaux de surface Indicateur floristique de fertilité des sols ou d'eutrophilie Indicateur "Odenator"			Régulation du climat global Capacité de stockage de CO2 du milieu (en tCO2e par ha de biomasse) Superficie du milieu stockant du carbone (en ha de biomasse) Températures minimales, moyennes et maximales pour chaque saison (C) Indicateur "Zone Climatique Locale"			
Régulation de la qualité de l'eau	Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau)	Favoriser la rétention des sédiments et des nutriments	Risques des sols			Épaisseur de l'horizon pédologique humifère en surface (en cm) Teneur en carbone organique labile Teneur en stock de carbone dans le sol (g C/g sol ou kg C/ha)	Régulation du climat local Températures minimales, moyennes et maximales pour chaque saison (C) Indicateur "Zone Climatique Locale"		
			Rétention, circulation et infiltration de l'eau			Favoriser l'infiltration Taux d'infiltration de l'eau dans le sol Mesure de la respiration du sol témoin d'une activité de minéralisation du sol et de la "capacité" abiotique Densité et biodiversité des vers de terre et enchytréides Taux de Bact-Tamino	Régulation du climat local Températures minimales, moyennes et maximales pour chaque saison (C) Indicateur "Zone Climatique Locale"		

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