



PRISE EN COMPTE DE LA BIODIVERSITE DES SOLS EN GESTION DES SITES ET SOLS POLLUES

ETAT DES LIEUX ET RETOURS D'EXPERIENCE – Table ronde

Cécile Grand, ADEME

Nicolas Pucheux, INERIS

Elsa Limasset, BRGM

Estelle Hedri, VALORHIZ

Lilian Marchand, RECORD

Hubert Léprond, EDF



Un **sol** : couche supérieure de la croûte terrestre, transformée par des processus climatiques, physico-chimiques et biologiques, et composée de particules minérales, de matière organique, d'eau, d'air et d'organismes vivants, organisée en horizons génériques. Elle est composée d'un sol de surface et le cas échéant d'un sol profond sous-jacent. Le sol comprend l'ensemble des horizons situés au-dessus du sous-sol.

Les sols sont sous pression

4 PRINCIPALES MENACES

Surexploitation

tassement, excavation...

Imperméabilisation

par les routes, parkings, constructions...

Pollution

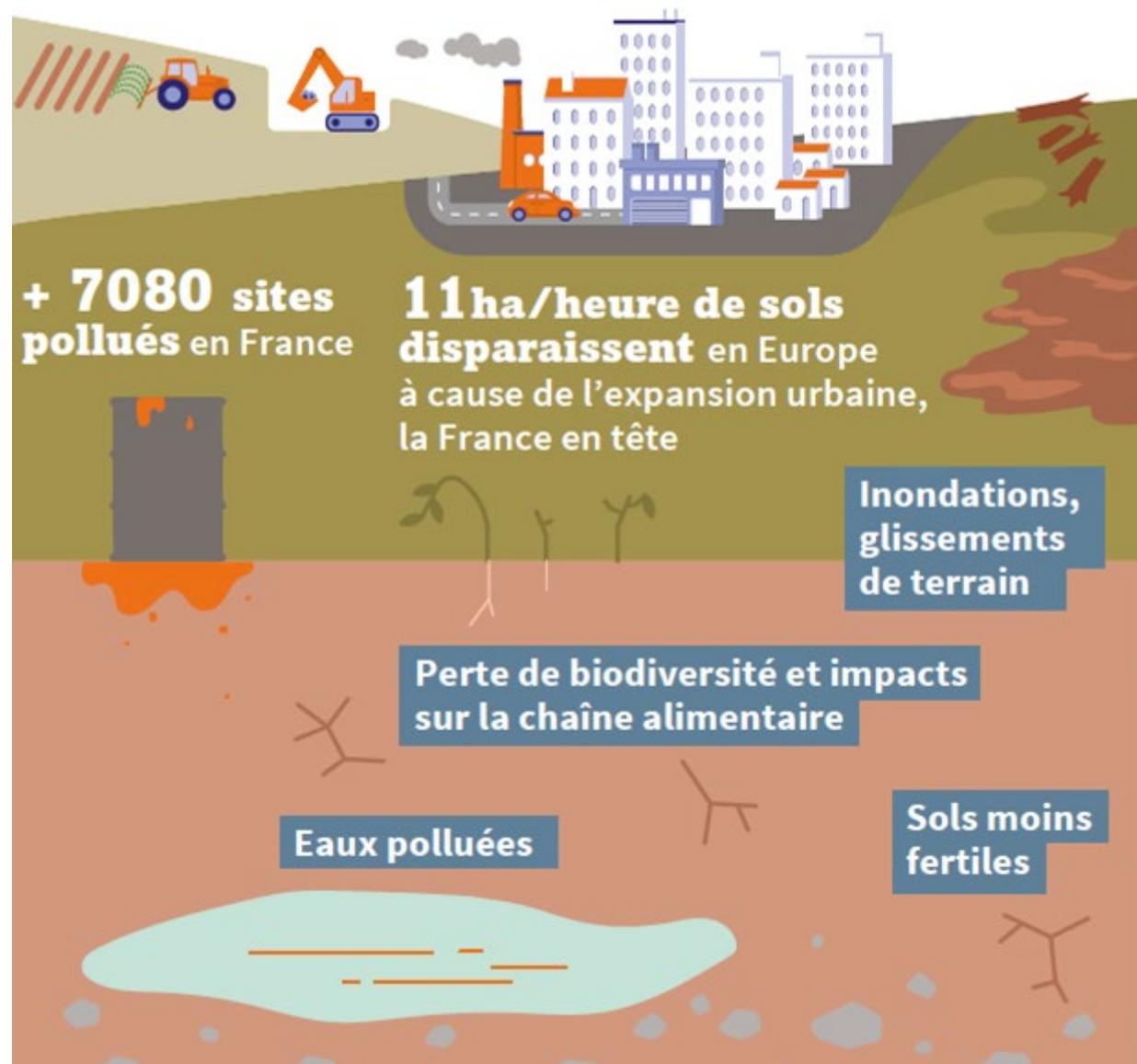
par les pesticides, produits chimiques, plastiques...

Érosion

liée à la déforestation, aux surfaces nues...

Le changement d'usage des sols est l'un des 5 facteurs responsables du déclin de la biodiversité

Rapport IPBES (2019)



Reconquête des sites pollués

- Lutte contre la perte de la biodiversité
 - Plan Biodiversité 2018
- Lutte contre l'artificialisation des sols
 - Loi Climat et Résilience 2021

Sites pollués à l'abandon

Friches polluées persistantes

Perte biodiversité

Perte fonctions écologiques de sols

Impacts sanitaires, environnementaux, sociaux et économiques

Réhabilitation écologique des sites pollués

Territoires plus résilients

Préservation et restauration biodiversité, nature en ville

Restauration des fonctions écologiques du sol

Gain écologique
Gestion durable des sols, nature en ville, parc de loisir etc.

Qu'est ce que la réhabilitation écologique d'un site pollué?

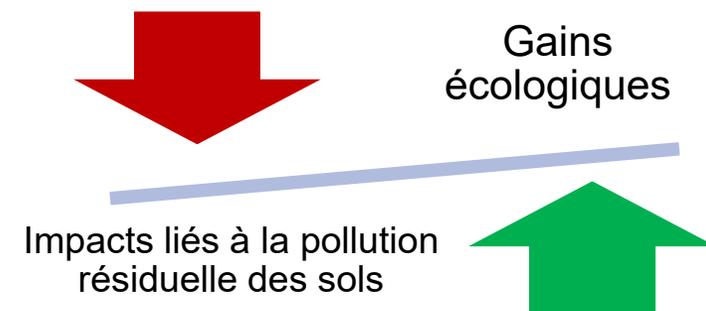
2 étapes d'intervention – au cas par cas

Remédiation pollution
contexte
réglementaire

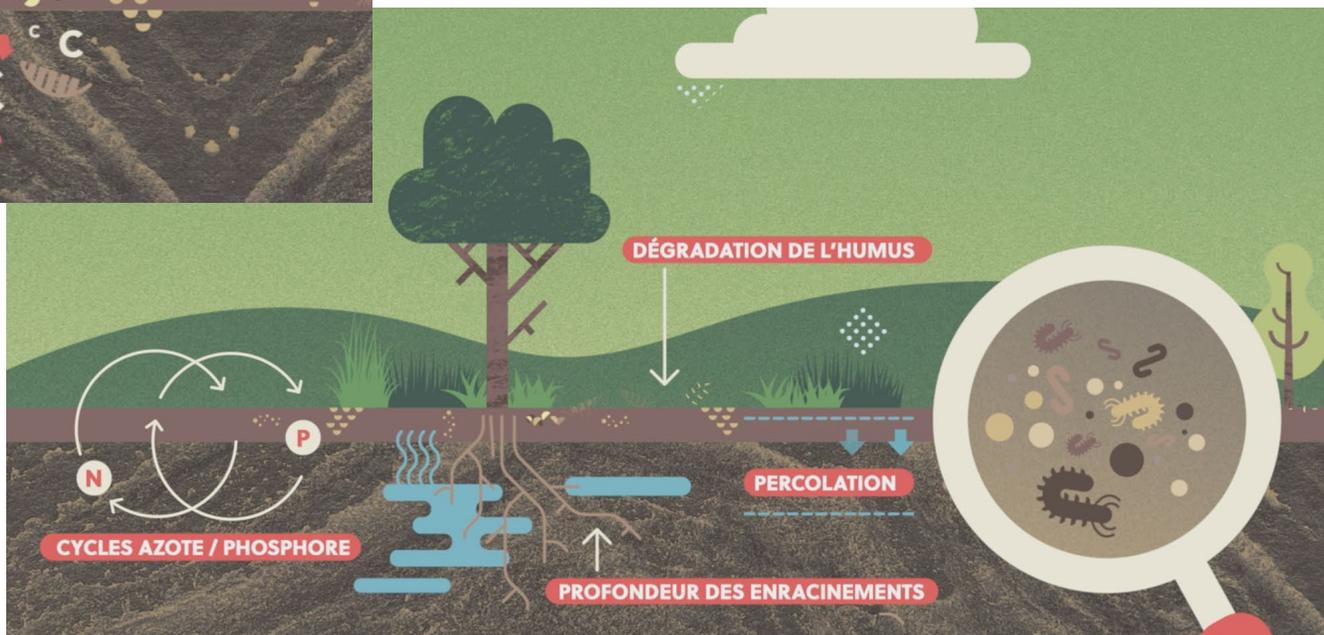
- Compatibilité pollution résiduelle avec l'usage futur
- Evaluation des risques sanitaires et écosystèmes

Restauration
écologique des sols

- Rétablir de nouvelles fonctions rendues par les sols
- Infiltration eau, stockage carbone, fertilité
- Solutions techniques: génie pédologique, phytoremédiation



REX BioTUBES - Estelle Hedri, VALORHIZ



GENIE ECOLOGIQUE



RECONSTRUCTION DE SOL





Déc 2016



Mai 2017



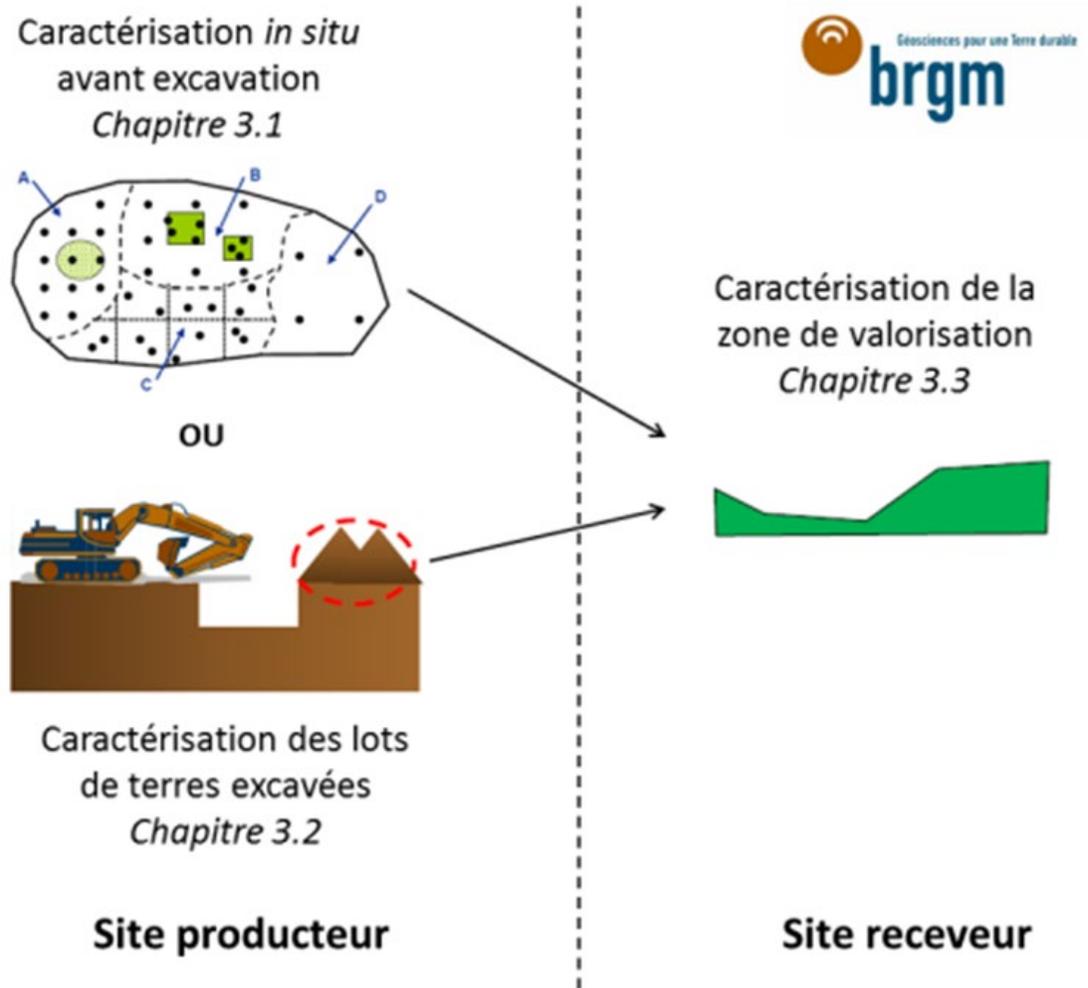
Juin 2018



Nov 2017



Mai 2018



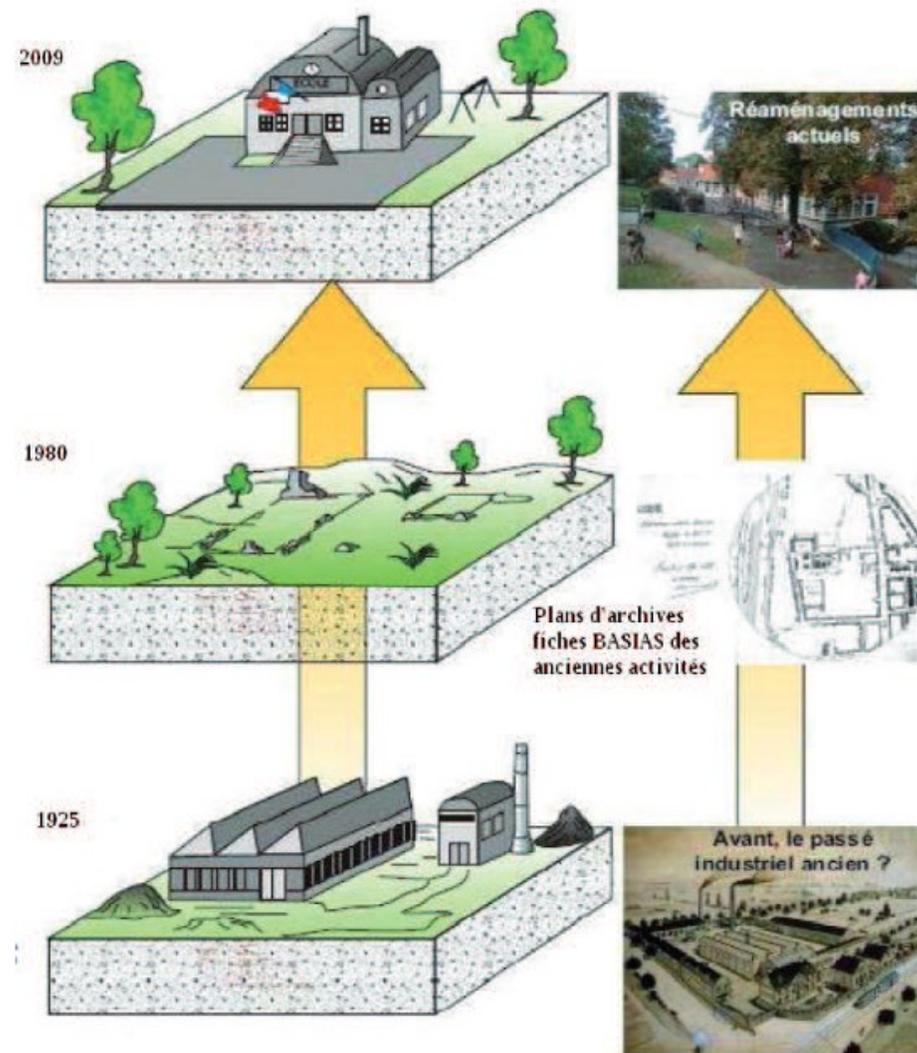
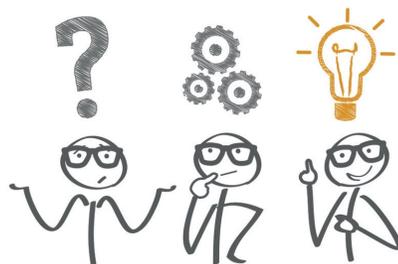
L'OUTIL RECORD POUR LE SUIVI DE LA RÉHABILITATION D'UN SITE EN INTÉGRANT LES SFN

Une commande RECORD



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 et à vérifier leur efficacité ?



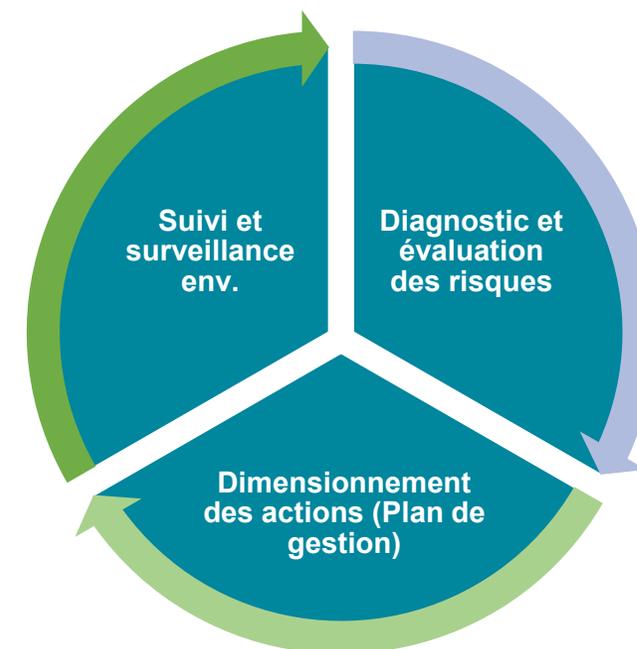
La proposition

Disposer d'un outil simple et opérationnel :

- Prenant en compte **les usages actuels** et **futurs** et les enjeux du projet d'aménagement
- Ciblant **les SfN** à privilégier selon les enjeux auxquels le porteur de projet est confronté
- Ciblant **les indicateurs** à suivre pour vérifier l'efficacité des mesures mises en œuvre



Projet de réhabilitation écologique



Présentation de l'outil

Outil sous Excel
 Codé sous Visual BASIC
 Accompagné d'un guide
 d'utilisation

Répondez aux questions ci-dessous afin de préciser le contexte de votre projet

Questions relatives à la

§ Le contexte dans lequel s'inscrit le projet

Oui
 Non

§ Quels sont les habitats observés sur le site

Espaces végétalisés non humides
 Espaces végétalisés humides
 Milieux aquatiques (plan d'eau)
 Milieux cultivés (culture, élevage)
 Linéaires végétalisés / arbres
 Surfaces majoritairement imperméabilisées
 Surfaces majoritairement minérales
 Terrains vacants, terrains vagues

§ Le site est-il localisé dans le périmètre d'une zone de réhabilitation de nappe ou soumise à un arrêté de dépollution

1.Contexte 2.Enjeux Annexe

A partir de la liste proposée, sélectionner les enjeux sociaux et environnementaux auxquels le projet de réaménagement doit répondre en priorité

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

Catégorie	Icone
CLIMAT	
ENVIRONNEMENT	
RESSOURCES	
SANTÉ PUBLIQUE BIEN-ETRE	

A partir de la liste proposée, sélectionner les solutions fondées sur la nature adaptées à votre projet

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	SOLUTIONS GRISES (EXEMPLES)
Stratégies d'aménagement urbain		<input checked="" type="checkbox"/> Maintien et amélioration de la continuité avec le réseau écologique	Tunnels ou passages à faune non végétalisés
		<input checked="" type="checkbox"/> Prise en compte de la répartition des espaces verts publics à travers la ville	Répartition hétérogène des espaces verts
Stratégies de protection et conservation		<input checked="" type="checkbox"/> Outils de planification contrôlant l'expansion urbaine	Augmentation du taux de surfaces construites en ville et de la fréquentation des espaces verts restants
		<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

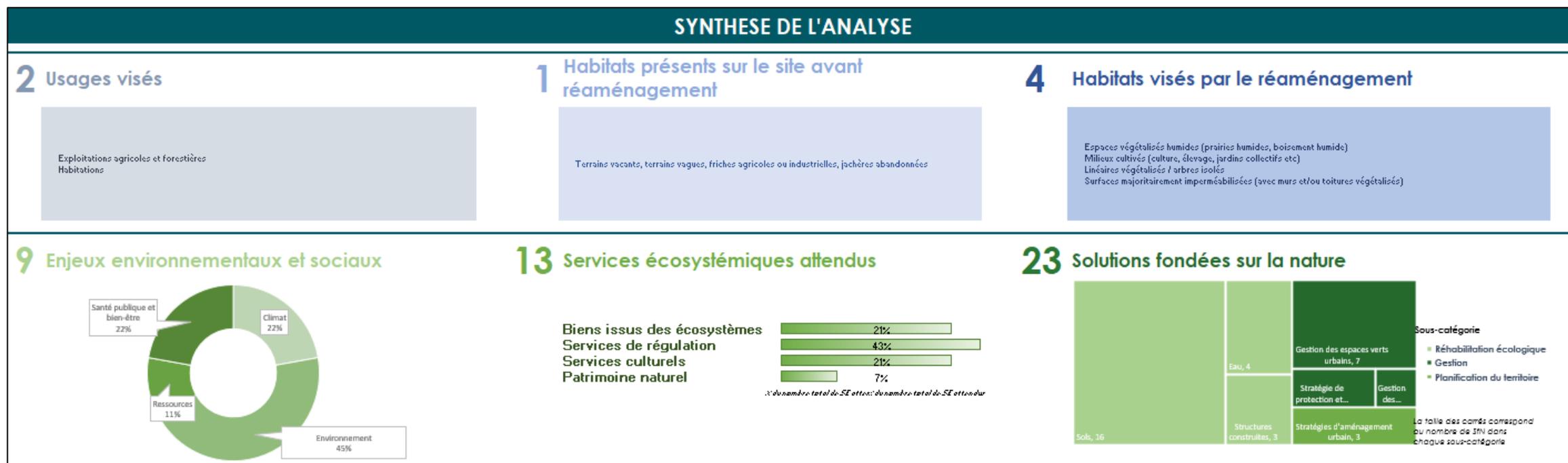
SOUS-TYPE	CATEGORIE	INTITULE DE LA SFN	SOLUTIONS GRISES (EXEMPLES)
Gestion des espaces verts urbains	Intervention humaines directes	<input checked="" type="checkbox"/> Mise en oeuvre d'une fertilisation raisonnée et utilisation de fertilisants organiques	Utilisation de fertilisants minéraux
		<input checked="" type="checkbox"/> Ajout de paillage	Accroissement de l'irrigation pour le maintien des espaces verts
		<input checked="" type="checkbox"/> Gestion différenciée	Plan de gestion classique, usage de produits phytosanitaires, pratiques intensives
Gestion des déchets	Utilisation de la faune	<input checked="" type="checkbox"/> Gestion intégrée des adventices et des ravageurs	Usage de produits chimiques sans combinaison avec d'autres solutions plus raisonnées
		<input checked="" type="checkbox"/> Utilisation d'animaux de pâturage	Tonte et élagage avec outils mécaniques conventionnels
		<input checked="" type="checkbox"/> Hôtel à insectes	-
		<input checked="" type="checkbox"/> Ruches	-
	Compost	<input checked="" type="checkbox"/> Compost, recyclage des déchets organiques compostables	Gestion conventionnelle des déchets par un prestataire. Amendements de synthèse pour les pratiques dans l'agriculture.

Solutions de réhabilitation écologique / création d'habitats

SOUS-TYPE	CATEGORIE	INTITULE DE LA SFN	SOLUTIONS GRISES (EXEMPLES)
AMENAGEMENT	DEMARAGE	1.Contexte 2.Enjeux 3.Services fournis 4.SfN	Annexe 1 Annexe 2 Annexe 3 Annexe 4 Glossaire



Présentation de l'outil



Présentation de l'outil

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	Amenités paysagères	Taux de satisfaction de la population par rapport aux espaces publics urbains (en % de la population ayant participé à l'enquête)
			Teneur en phosphore dans les sols		Nombre de rochers installés sur les sites (en nombre de rochers)
Apiiculture	Rétention, circulation et infiltration de l'eau	Ajuster l'irrigation	Teneur en azote dans les sols	Apiiculture	Qualité du miel par la concentration en hydroxyméthylfurfural (HMF) (en mg/kg de miel)
	Habitats d'espèces	Avoir une réserve en eau disponible pour les plantes	Minéralisation de l'azote dans les sols	Éléments protégés des écosystèmes et biodiversité ordinaire	Volume de miel et autres produits issus de la ruche (en kg par ruche et par an)
Régulation du climat global	Stockage, recyclage et transformation des matières organiques (carbone)	Connaître le stock de carbone dans la végétation	Potential d'accueil de la végétation pour les pollinisateurs	Intérêt éducatif et pédagogique	Diversité spécifique d'azote par l'indice de Shannon (sans unité)
			Biomasse aérienne et souterraine de la végétation (g C/ha)		Nombre de fauces d'espèces exotiques envahissantes (au recensement en m ²)
Régulation du climat local	Contrôle de la composition chimique de l'atmosphère et contribution aux processus climatiques (température, hygrométrie)	Connaître le stock de carbone dans les sols	Indicateur "Surface terrestre"	Intérêt récréatif, de loisir	Nombre de fauces d'espèces exotiques envahissantes (au recensement en m ²)
			Indicateur de structure de la végétation (% couvert végétal 2)		Potential des zones susceptibles d'accueillir la biodiversité (en ha)
Régulation de la qualité de l'air	Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau)	Connaître le stock de carbone dans les sols	Épandeur de l'harzin phéologique humifère en surface et en feu (en cm)	Produits de la cueillette	Préparation d'espace vert urbain (en % de la surface totale d'azote)
			Teneur en azote dans les sols		Richesse en faune et flore pétrinaire et faune ordinaire (en nombre d'espèces)
Régulation de la qualité de l'eau	Rétention et fourniture des nutriments pour les organismes du sol et les végétaux	Favoriser la rétention des sédiments afin de constituer une minéralisation	Indice de verdissement	Produits de l'agriculture	Nombre d'enfants de 6 à 12 ans participant à des ateliers de médiation scientifique par site par an
			Densité d'arbres		Accessibilité (en km, en minutes)
Régulation de la qualité de l'eau	Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau)	Favoriser la rétention des sédiments afin de constituer une minéralisation	Indice de canopie	Régulation de la qualité de l'air	Opportunités de rendez-vous marqués par une estimation du nombre d'habitants habitant à proximité des zones vertes et zones récréatives accessibles aux usagers (habitant total en %)
			Suivi hygrométrique et thermique de l'air		Nombre de visiteurs sur les sites par an
Régulation de la qualité de l'eau	Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau)	Favoriser la rétention des sédiments afin de constituer une minéralisation	Analyse de pollen transporté par les abeilles pour détecter d'éventuels pollinifères de la région (en mg/m ³)	Régulation de la qualité de l'eau	Surface d'espace vert par habitant (en m ² par habitant)
			Fraction volatile des polluants		Volume de produits issus de la cueillette cueillir sur les sites (en kg par an)
Régulation de la qualité de l'eau	Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau)	Favoriser la rétention des sédiments afin de constituer une minéralisation	Taux de recouvrement de la végétation sur les sites (%)	Régulation de la qualité de l'eau	Nombre de bêtes sur les sites (par espèce et par ha)
			Teneur en phosphore dans les sols		Rendement par type de culture sans cueillette (en t/ha et par an)
Régulation de la qualité de l'eau	Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau)	Favoriser la rétention des sédiments afin de constituer une minéralisation	Teneur en azote dans les sols	Régulation de la qualité de l'eau	Rendement de l'élevage par type de produit comme la viande, le lait, etc. (en tonnes par an)
			Teneur en phosphore dans les sols		Rendement des cultures fourragères d'azote (en tonnes par ha et par an)
Régulation de la qualité de l'eau	Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau)	Favoriser la rétention des sédiments afin de constituer une minéralisation	Teneur en azote dans les sols	Régulation de la qualité de l'eau	Superficie des cultures vivrières sur les sites (en ha)
			Teneur en azote dans les sols		Superficie des cultures fourragères sur les sites (en ha)
Régulation de la qualité de l'eau	Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau)	Favoriser la rétention des sédiments afin de constituer une minéralisation	Indicateur "Odenator"	Régulation de la qualité de l'air	Aggrégation par l'indice ATM01 disponible dans l'agglomération (sans unité)
			Indicateur "Odenator"		Concentration de l'air en particules et polluants atmosphériques (pour les PM10 et 2,5 ; dioxyde d'azote ; ozone ; dioxyde de soufre) (en microgrammes/m ³ de l'air)
Régulation de la qualité de l'eau	Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau)	Favoriser la rétention des sédiments afin de constituer une minéralisation	Ruqrité des sols	Régulation de la qualité de l'eau	Qualité physico-chimique et biologique des eaux superficielles et souterraines en amont et en aval d'azote (concentration en polluants)
			Fraction mobile des polluants		Capacité d'absorption de la pollution d'azote comparée à une ruche locale à proximité (concentration en polluants par ha)
Régulation de la qualité de l'eau	Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau)	Favoriser la rétention des sédiments afin de constituer une minéralisation	Épandeur de l'harzin phéologique humifère en surface (en cm)	Régulation de la qualité des sols	Qualité physico-chimique et biologique des sols comparée à une ruche locale à proximité (paramètres : en %, taux de MO en %, carbone actif en mm, concentration en N, K, Mg, Ca, nitrate/ammonium, nitrate/nitrite)
			Teneur en carbone organique labile		Niveau sonore moyen sur une période déterminée : L _{den} jour, L _{den} nuit, L _{den} nuit (en dB)
Régulation de la qualité de l'eau	Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau)	Favoriser la rétention des sédiments afin de constituer une minéralisation	Teneur en azote dans les sols	Régulation des nuisances sonores	Présence de barrières végétales permettant de réduire la pollution sonore (en mètre linéaire d'arbres, en ha d'espace vert)
			Teneur en phosphore dans les sols		Capacité de stockage de CO2 du milieu (en tCO2e par ha de biotope)
Régulation de la qualité de l'eau	Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau)	Favoriser la rétention des sédiments afin de constituer une minéralisation	Indicateur "Odenator"	Régulation du climat global	Superficie du milieu accueillant du carbone (en ha de biotope)
			Indicateur "Odenator"		Températures minimales, moyennes et maximales pour chaque saison (°C)
Régulation de la qualité de l'eau	Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau)	Favoriser la rétention des sédiments afin de constituer une minéralisation	Taux d'infiltration de l'eau dans les sols	Régulation du climat local	Indicateur "Zones Climatiques Locales"
			Moyenne de la respiration des sols témoin d'une activité de minéralisation durant la saison estivale		
Régulation de la qualité de l'eau	Rétention, transformation et élimination des polluants organiques et inorganiques (eau)	Favoriser la rétention des sédiments afin de constituer une minéralisation	Densité et biodiversité des vers de terre et enchytréides	Régulation du climat local	
			Taux de Bact-Lamina		

TATION | DEMARRAGE | 1.Contexte | 2.Enjeux | 3.Services fournis | 4.SfN | 5.Résultats | Annexe 1 | Annexe 2 | Annexe 3 | Annexe 4 | Glossaire | + | ◀ | ▶



Lilian Marchand

Exemple de reconversion d'une centrale thermique



Bloc usine

Parc à fioul (en déconstruction)

Terrains non exploités,
Rétention complémentaire
de parc à fioul ...



Préparation
du sol avant
semis

Prairie à n+2

En 2019, réalisation d'un semis au niveau du parc photovoltaïque construit sur l'ancienne rétention de la centrale thermique : 6 ha.

Réhabilitation d'un site après déconstruction

- Suite à la déconstruction de bâtiments finalisée en 2019, action volontaire de restauration écologique de la zone par une prairie :
 - Sol construit à partir de remblais (bétons concassés) puis apport de terre végétale ;
 - Semis à partir d'un mélange du commerce en 2019 ;
 - Bonne reprise mais le mélange n'était pas optimal (espèces ornementales) + présence d'une espèce envahissante et d'une espèce locale protégée).
- Expertise du Conservatoire Botanique National pour réalisation d'un sur-semis avec récolte de graines dans le milieu naturel pour constituer un nouveau mélange.
 - Réalisation du sur-semis au printemps 2021 et suivi de la reprise



Vue satellite de la zone avant et après déconstruction du bâtiment



Bâtiment avant déconstruction



Zone après apport de terre végétale



Première prairie semée à N+1

Exemple de reconversion d'une centrale hydroélectrique



EVALUATION DU RISQUE CHIMIQUE POUR LES ÉCOSYSTÈMES – TRIADE – RETOUR D'EXPÉRIENCE DU PROJET TRIPODE.

Contexte et enjeux

La reconversion des friches => situation de blocage liée à la pollution des sols et à la dégradation du foncier

Voies de valorisation possibles : renaturation, réserve biologique, intégration à la trame verte...

=> Nécessité d'évaluer les impacts de ces usages alternatifs, ou la possibilité de les mettre en place.

Limite d'une démarche classique (concentration totale)

Le sol étant pollué, la comparaison des concentrations mesurées avec la valeur seuil traduit un risque pour les écosystèmes.

Pourtant un écosystème s'est installé => la situation est plus complexe.



Friche sans usage photographiée dans la région du Grand Est

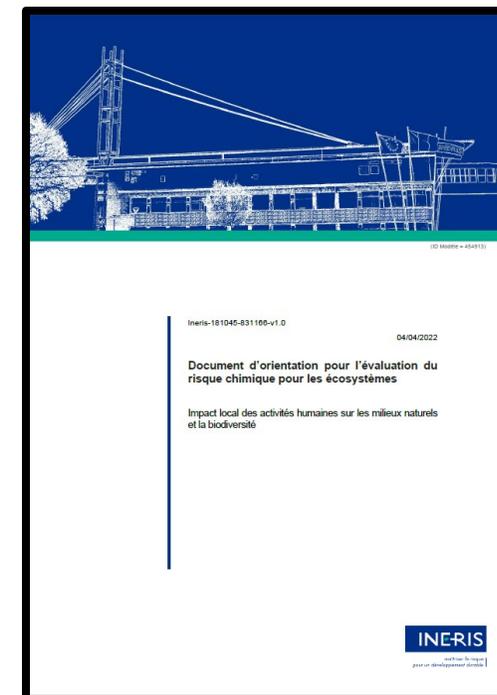
Contexte et enjeux

L'information portée par la mesure des concentrations totales du sol est incomplète, il faudrait utiliser des outils issus de différents domaines scientifiques (de l'évaluation du risque) pour diminuer les incertitudes et parvenir à un résultat plus robuste.

Principe du poids de la preuve.

Démarche soutenue par

- Le « Document d'orientation pour l'évaluation du risque chimique pour les écosystèmes » (Ineris, 2022)
- La **norme ISO 19204**, Qualité du sol — Procédure d'évaluation des risques écologiques spécifiques au site de la contamination des sols (**approche TRIADE** de la qualité du sol)



La méthode TRIADE

Procédure normalisée pour l'évaluation des risques pour les écosystèmes (ERE) pour le compartiment terrestre.

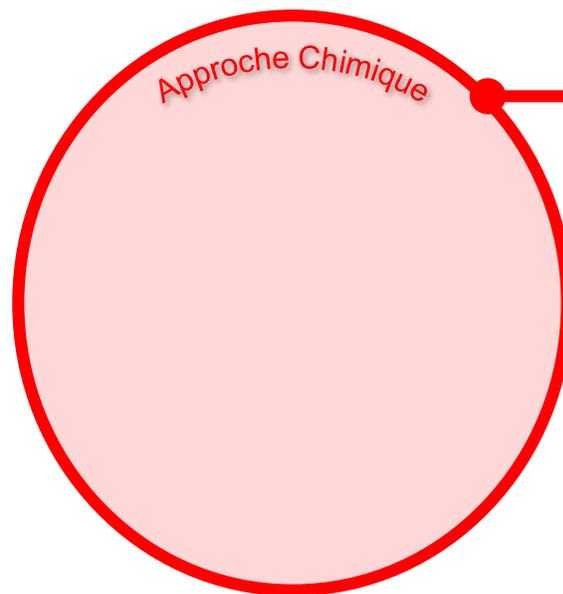
Outil décisionnel.

Visé à une exploitation optimale des données au travers d'un cadre conceptuel:

- Utilisation complémentaire de trois approches différentes du risque (chimique, écotoxicologique, écologique)
- Compensation des incertitudes d'une approche (Line of Evidence, LoE) avec les atouts des autres approches
- Principe du « poids de la preuve », la prise en compte de la biodiversité vient compléter l'interprétation des mesures de concentration dans le sol.

Utilisé en routine et dans un cadre réglementaire au Pays-Bas (plus de 50 évaluations sur des sites).

La méthode TRIADE



Approche Chimique

Substance par substance
Concentrations mesurées vs.
valeurs seuils

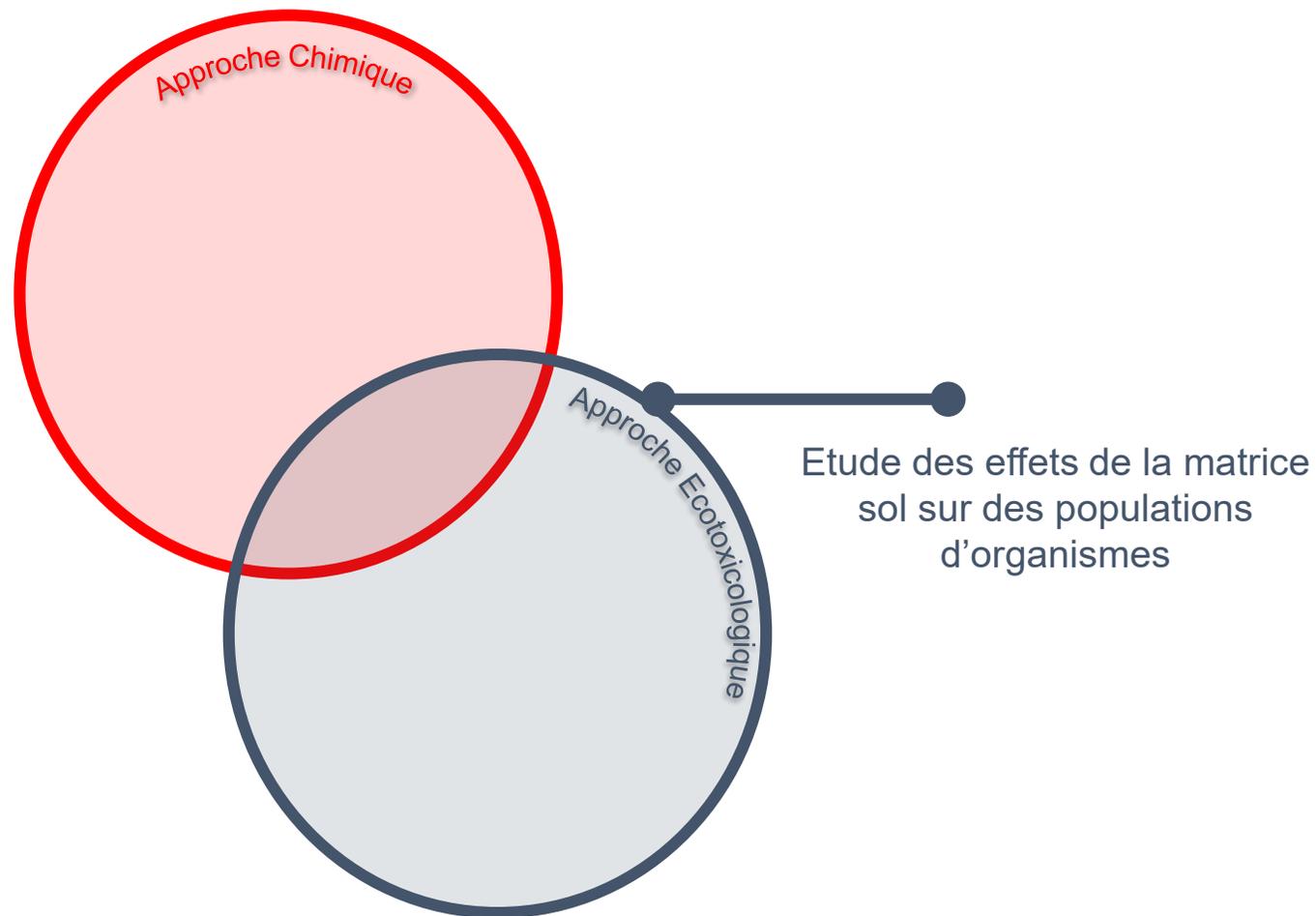


- Prise en compte des niveaux de contamination
- Eventuellement prise en compte de la biodisponibilité des substances

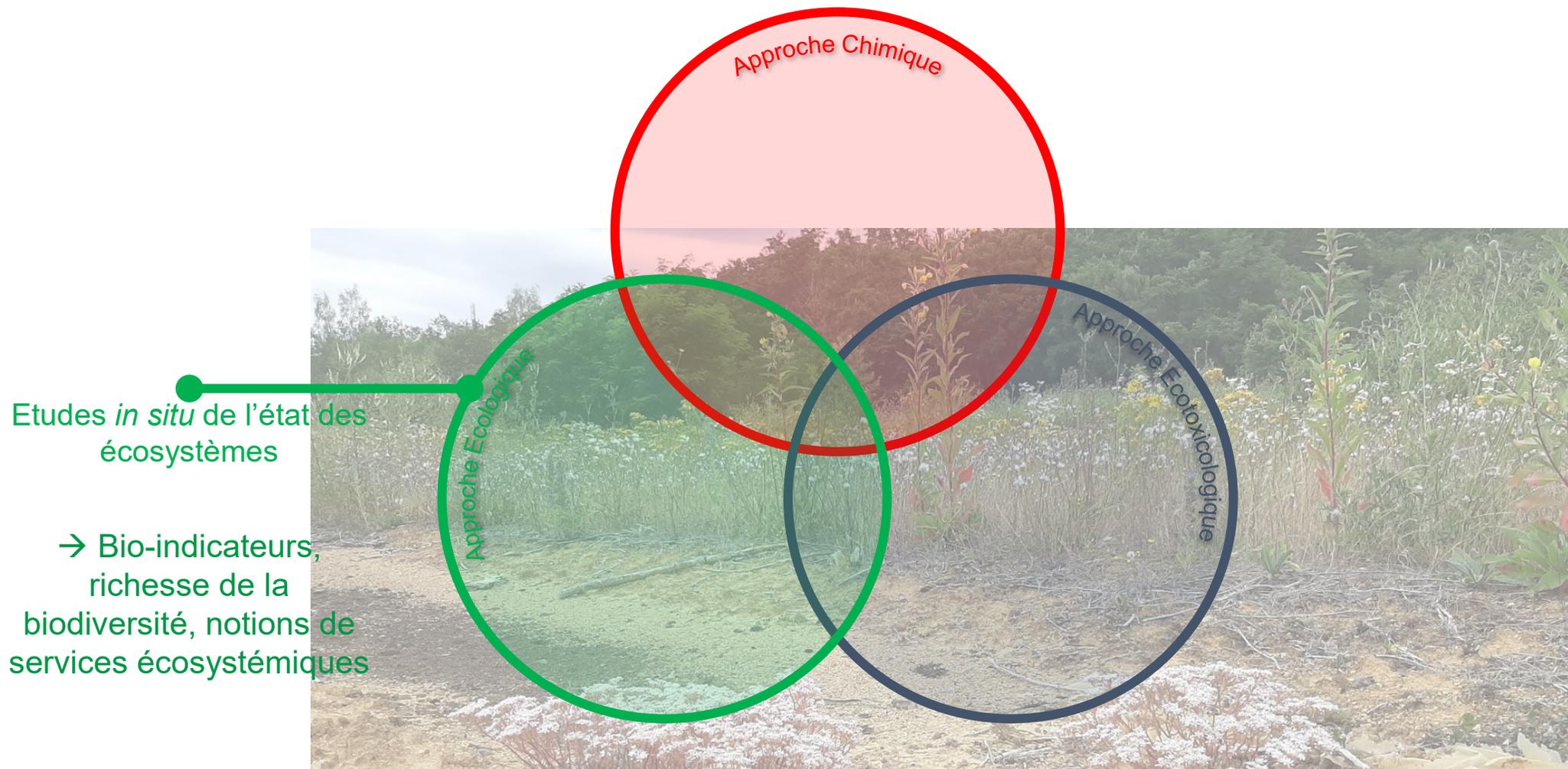
La méthode TRIADE



→ Essais d'écotoxicité, court terme, long terme ...

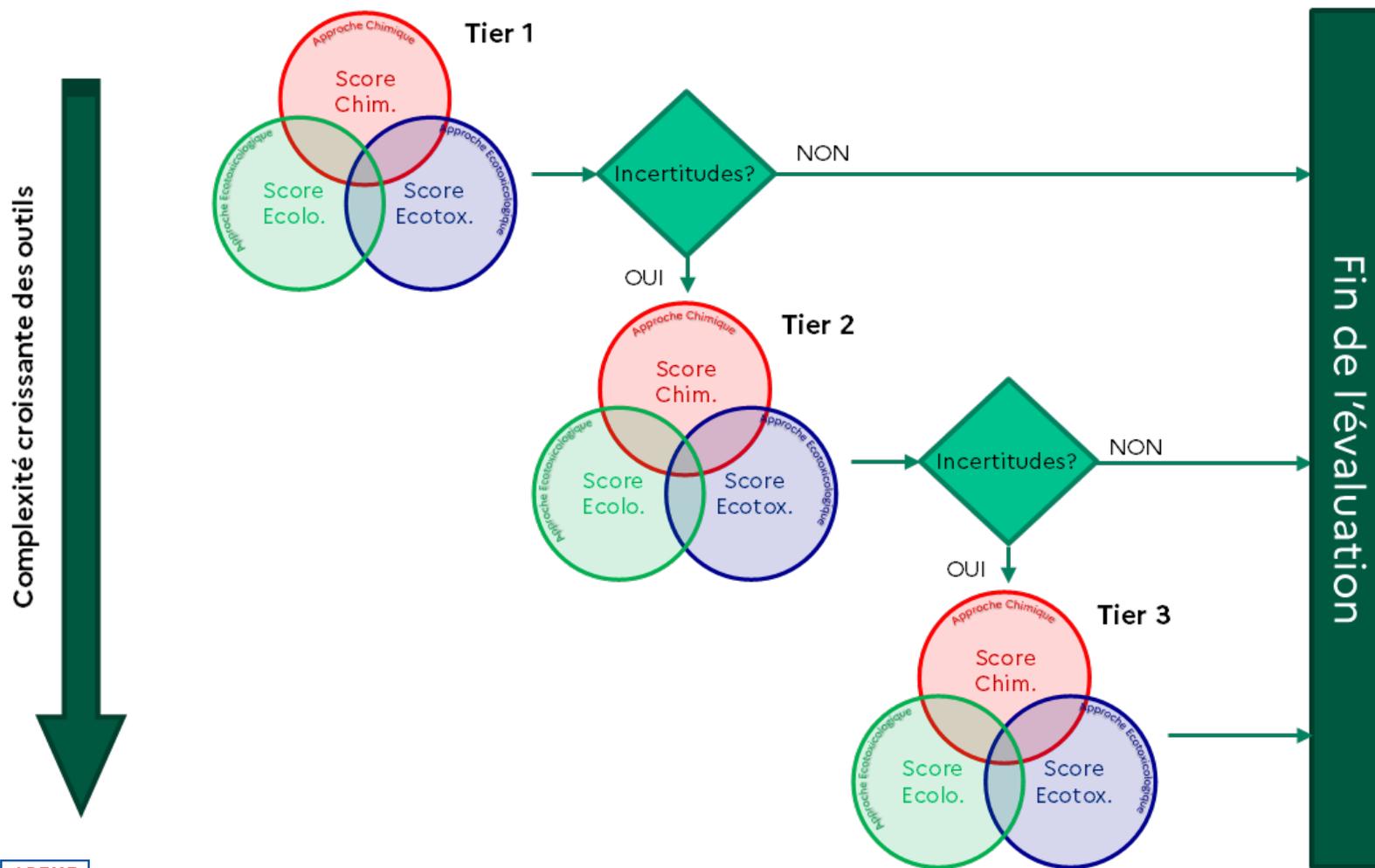


La méthode TRIADE



La méthode TRIADE

TRIADE: UNE APPROCHE ITÉRATIVE



Le projet TRIPODE

Améliorer la norme Triade

- Lever les verrous techniques
- Evaluer la pertinence et l'applicabilité des indicateurs proposés dans la norme
- Déterminer un cadre pour interpréter les indices de risques

Faciliter son transfert aux acteurs des SSP

- Conception d'un guide opérationnel
- Rédaction de fiches techniques
- Conception d'un logiciel pour prendre en main la méthode.

Deux cas d'études

- Région parisienne, île Saint Denis, terrain Lil'Ô
- Pas-de-Calais, commune de Mazingarbe



Le projet TRIPODE



- Sol témoin (non modifié)
- Sol amendé (homogénéisé + Biochar miscanthus)
- Sol non amendé (homogénéisé)
- Zone périphérique (bande)



Problématique supplémentaire de la caractérisation de l'efficacité d'une mesure de gestion.

Le projet TRIPODE (Mazingarbe) Tier 1

Niveau 1

Chimie

Détermination de la concentration totale dans les sols

Ecotoxicologie

Essai d'inhibition de l'activité déshydrogénase (*Arthrobacter globiformis*) - ISO/DIS 18187

Essai d'évitement chez le ver *Eisenia fetida* - ISO 17512-1

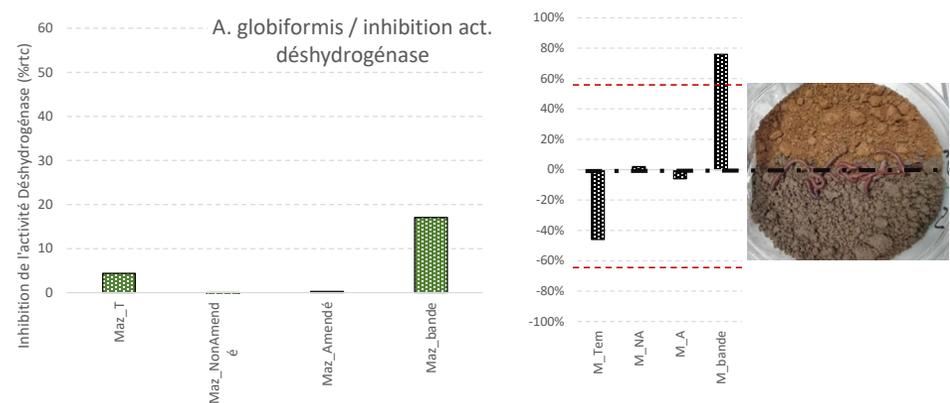
Détermination de la toxicité aiguë vis-à-vis du vers de terre *Eisenia fetida* - NF EN ISO 11268-1

Ecologie

Analyse du couvert végétal du site

Classification des habitats (référentiel CORINE biotope de l'union européenne)

LoE (écotoxicologie)

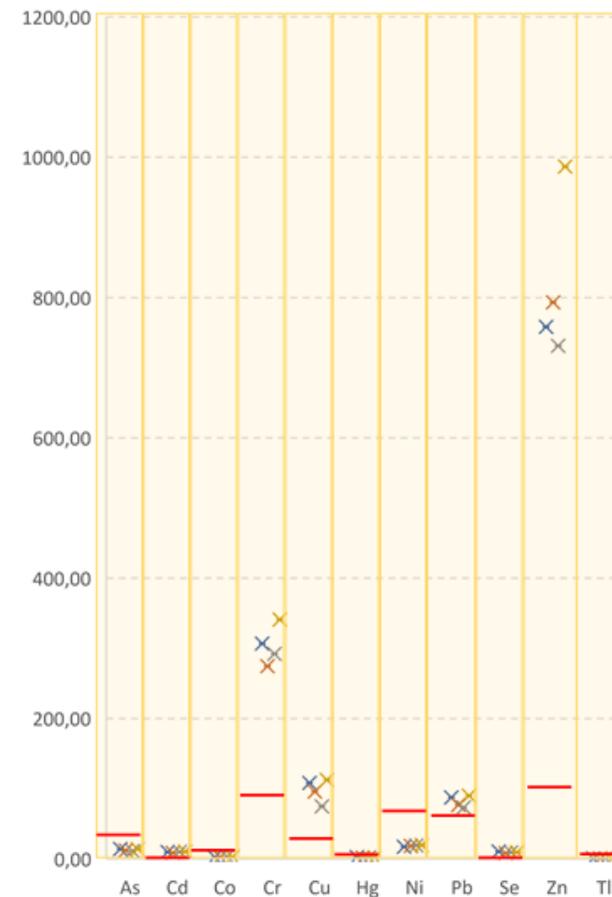


Un effet léger sur la parcelle « bande »

LoE (écotoxicologie)

100% de recouvrement végétal (mais visiblement faible biodiversité)

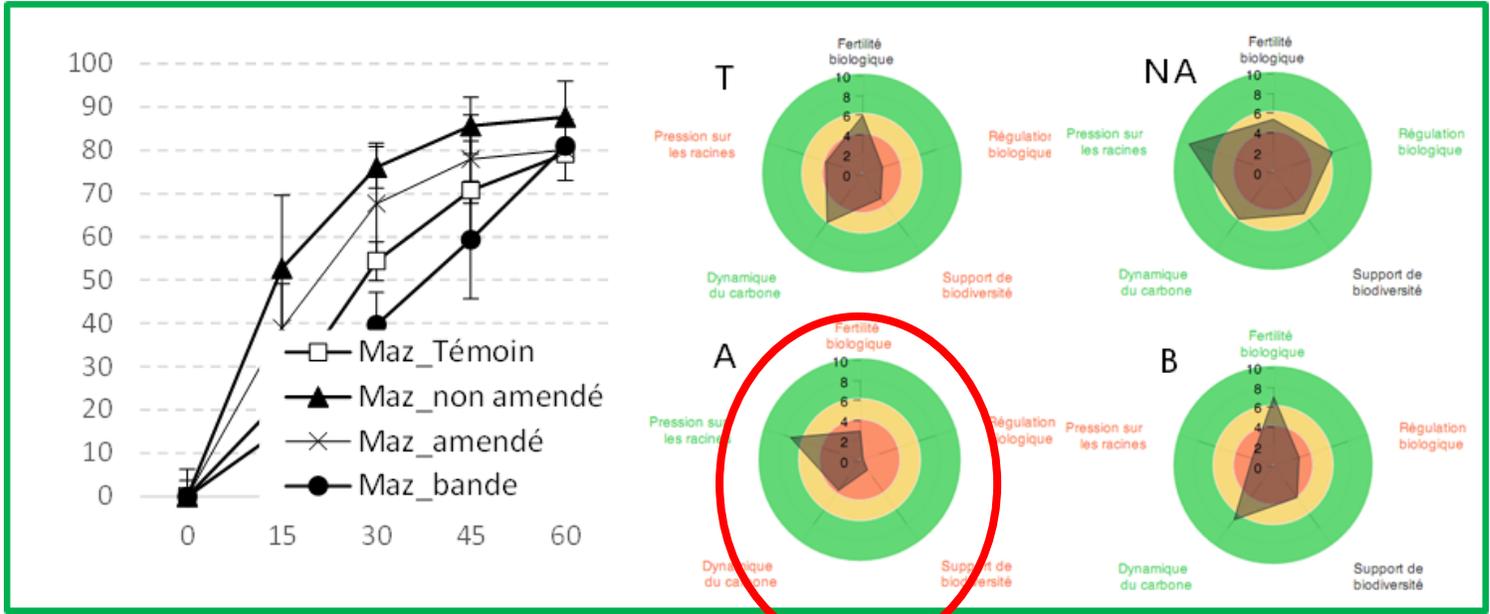
LoE (chimie)



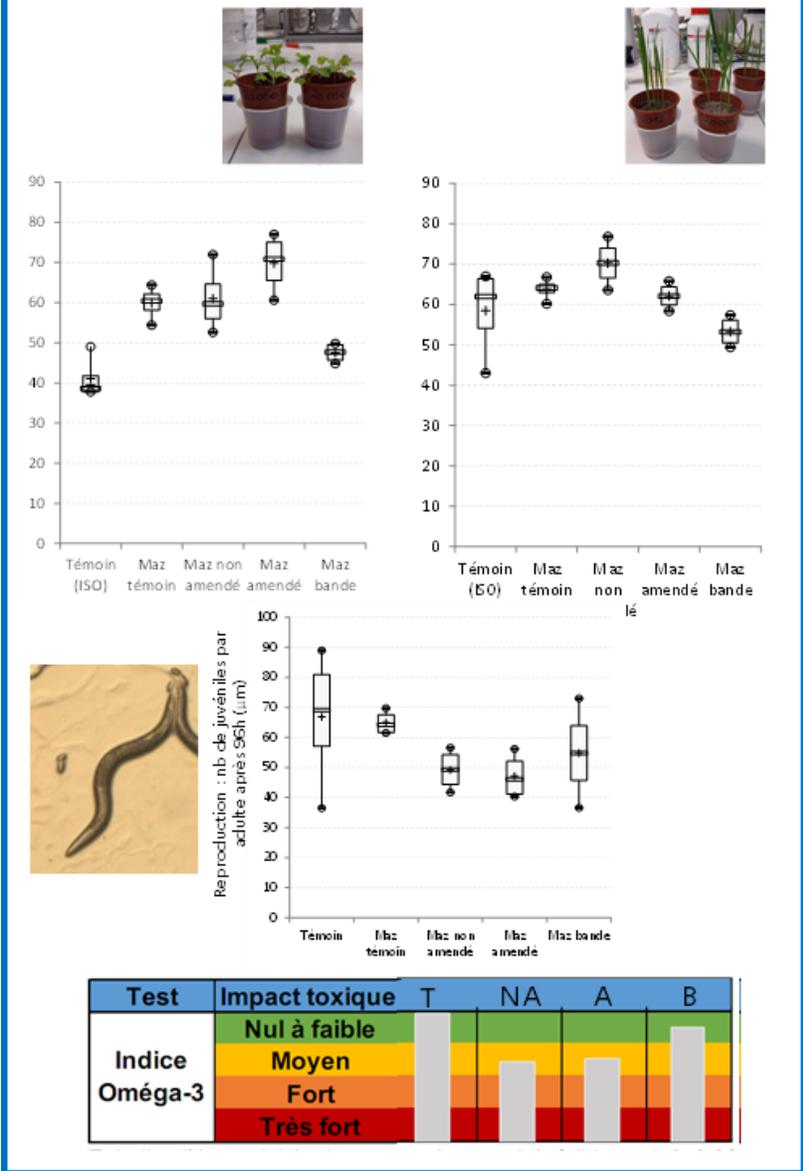
Une pression toxique faible à moyenne

Le projet TRIPODE (Mazingarbe) Tier 2

Niveau 2	Chimie	Analyse de la fraction potentiellement biodisponible (e.g. extraction CaCl ₂) Mesure de la bioaccumulation chez l'escargot (indice SET)
	Ecotoxicologie	Essais de mortalité et d'inhibition de la reproduction des nématodes (C.elegans) - ISO 10872 Composition en acides gras foliaires chez Lactuca sativa (Indice oméga 3) - XP X31-233 Test d'inhibition émergence et croissance des végétaux supérieurs (2 espèces) - ISO 11269-2
	Ecologie	Recensement de la diversité trophique de la communauté de nématodes Capacité de dégradation de la cellulose



Des effets marqués sur la biodiversité, invisibles au Tier 1

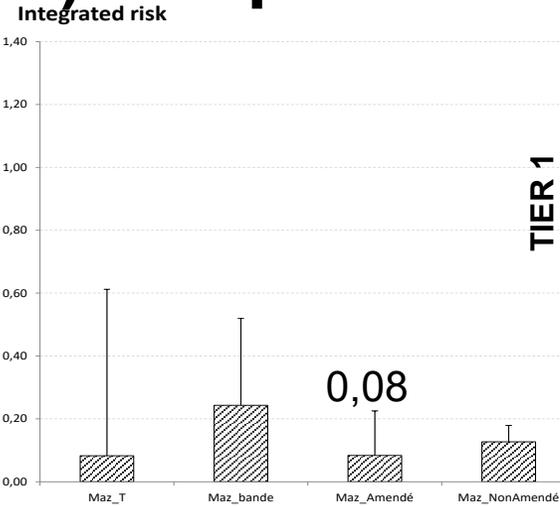
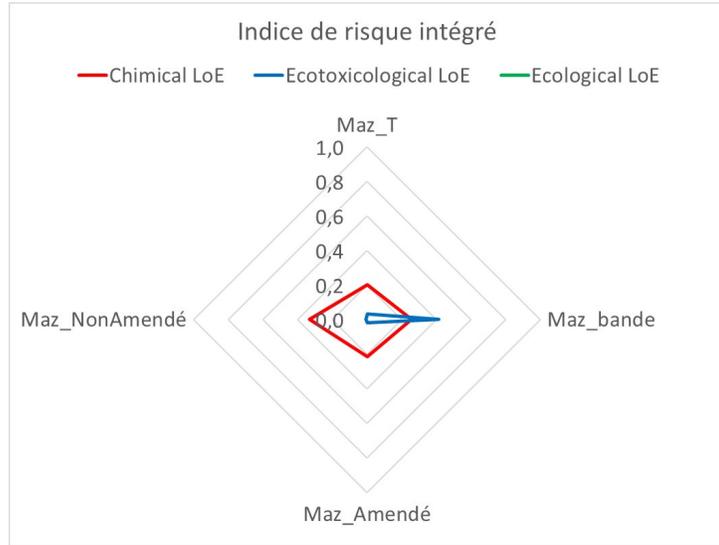


Effet écotoxique modéré pour les parcelles A et NA

Le projet TRIPODE (Mazingarbe) Risque



TIER 1



TIER 1

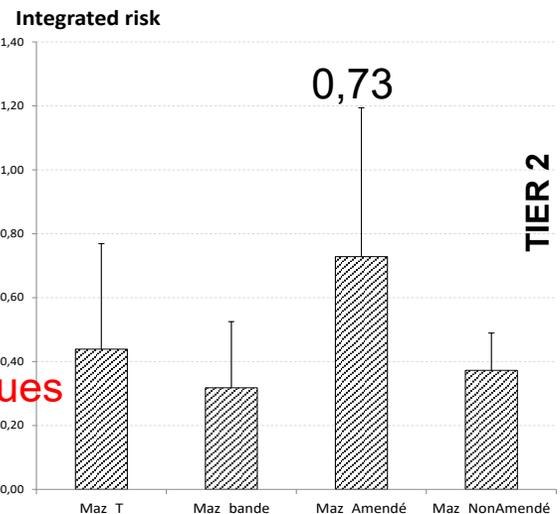
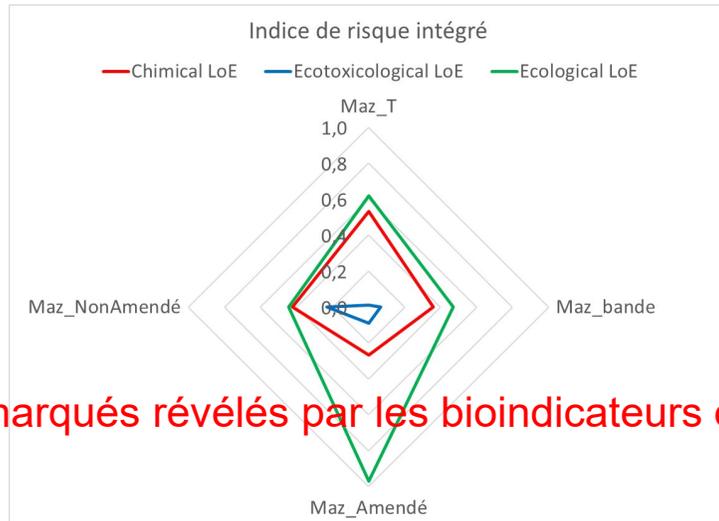
Incertitudes

Maz_T	Maz_B	Maz_A	Maz_NA
0,11	0,21	0,12	0,19



Arrêt de l'évaluation

TIER 2



TIER 2

Incertitudes

Maz_T	Maz_B	Maz_A	Maz_NA
0,33	0,21	0,47	0,12



Arrêt de l'évaluation

Tier 3

Arrêt de l'évaluation

Des effets marqués révélés par les bioindicateurs écologiques

La Triade les suites

Tripode (fin mi-2024)

Retour sur les outils les plus exigeants proposés par la norme,
Retour d'expérience d'un Bureau d'étude,

Niveau 3	Chimie	Utilisation de modèles et simulation en colonne
	Ecotoxicologie	Toxicité chronique sur les plantes supérieures - ISO 22030
	Ecologie	Détermination de la diversité microbologique du sol et des groupes fonctionnels (par qPRC)

Révision de la norme ISO 19204 « Triade »

La norme va être révisée en 2023, objectif 2025.
La France est identifiée comme chef de projet.

D'autres projets

En cours et déposés, nationaux et internationaux.
En contact avec le Centre Ecotox (oekotoxzentrum – Suisse) (Triade-like sur pesticides)