



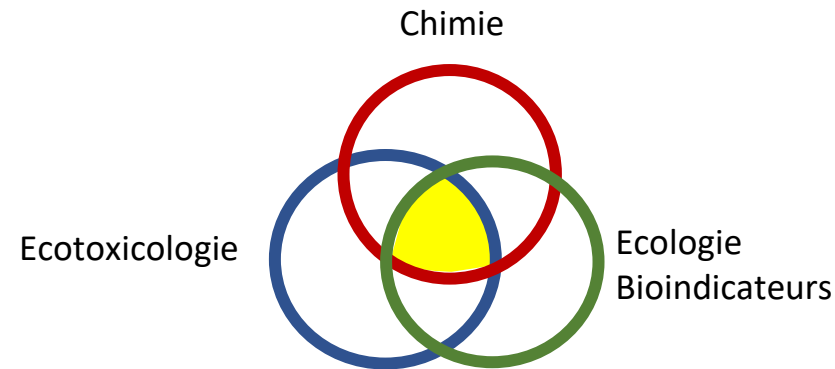
GESIPOL DIVA – 2022/2026

Utilisation conjointe de bioindicateurs et d'indicateurs relevant de la chimie, de l'écotoxicologie pour suivre la trajectoire de réhabilitation d'un site contaminé



Norme ISO 19204, Triade

Soil quality – Procedure for site specific ecological risk assessment of soil contamination



Constat DIVA

Complexité (*inutile ?*) des équations

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)}$$

$$\varphi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} n! \sim \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n$$

$$\nabla = \hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z} \quad \det(A) = \sum_{i,j,k} \epsilon(i,j,k) \prod_{l=1}^3 a_{i,j,l}$$

$$\sum_{k=0}^n \frac{n(n+1)}{2} B > \frac{1}{T} \int_0^T f(x) dx \quad e^x = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n$$

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} \quad P(A) = \frac{\text{Card}(A)}{\text{Card}(\Omega)} \quad \sum_{n=0}^{\infty} n = -\frac{1}{12}$$

$$A = PDP^{-1} \quad \left(\frac{1}{2}\right)! = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad \binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

$$\int_a^b f(x) dx = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n f\left(a + k \frac{b-a}{n}\right)$$

$$f'(a) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h} \quad \int_{-\infty}^{\infty} e^{-x^2} dx = \sqrt{\pi}$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad F(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt$$

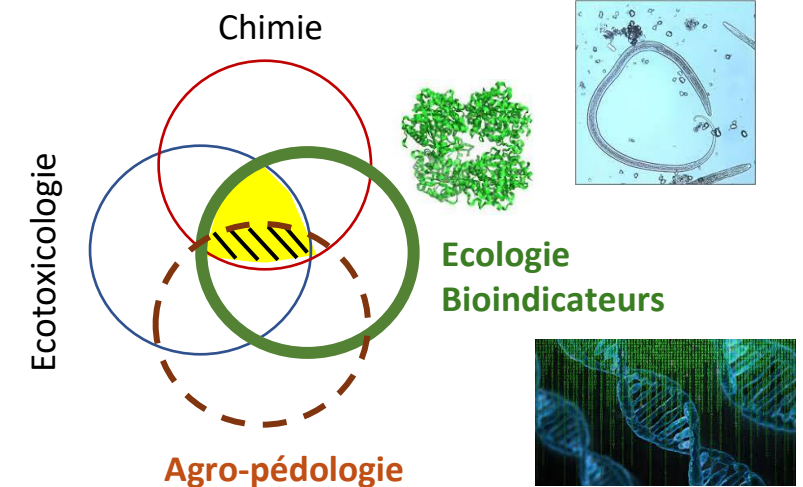
$$\hat{f}(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i \xi x} dx \quad \iint_{\Omega} (\nabla \cdot \mathbf{F}) dx = \oint_{\partial \Omega} \mathbf{F} \cdot \mathbf{n} \quad \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2}$$

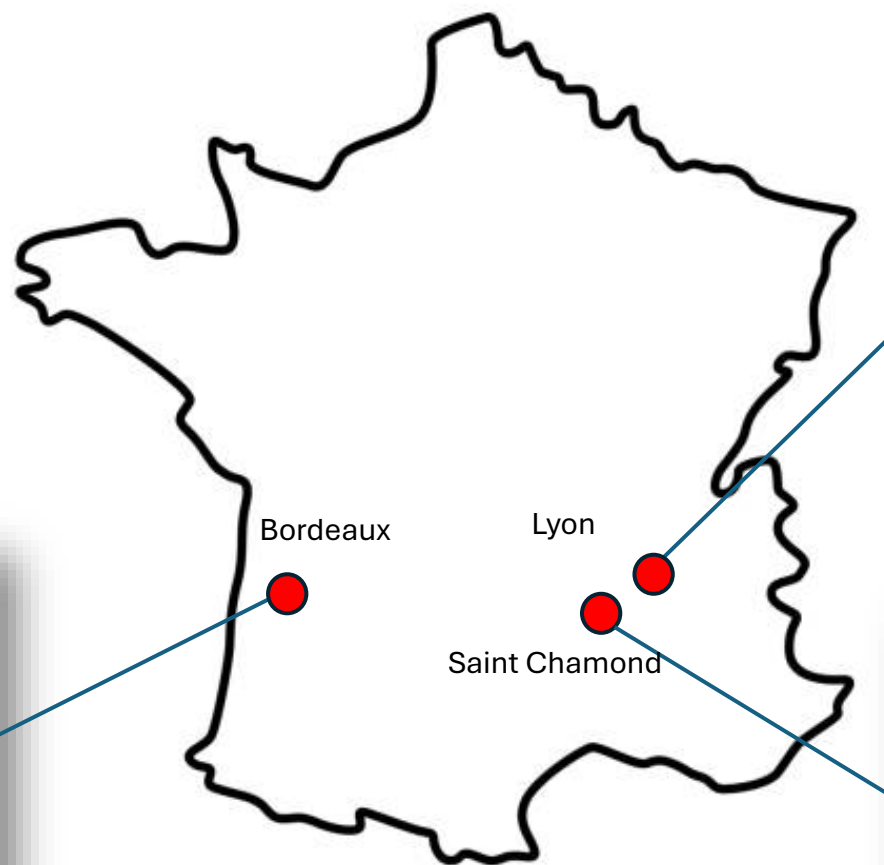


Questionnements DIVA

Comment s'appuyer sur l'approche TRIADE pour traduire l'état général d'un sol et sa santé

Focus DIVA : sols urbains dégradés/réhabilités

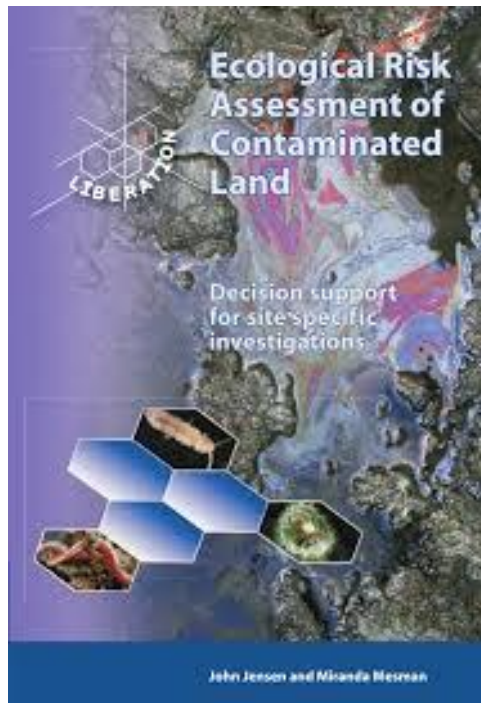




**Simplification du calcul pour
caractériser l'état d'un sol
par comparaison à un état de
référence**

- Indices d'état d'un sol
- Trajectoires de réhabilitation

Vers une simplification du calcul ?



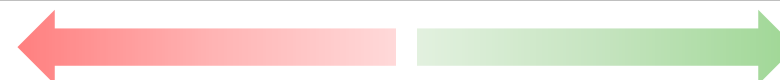
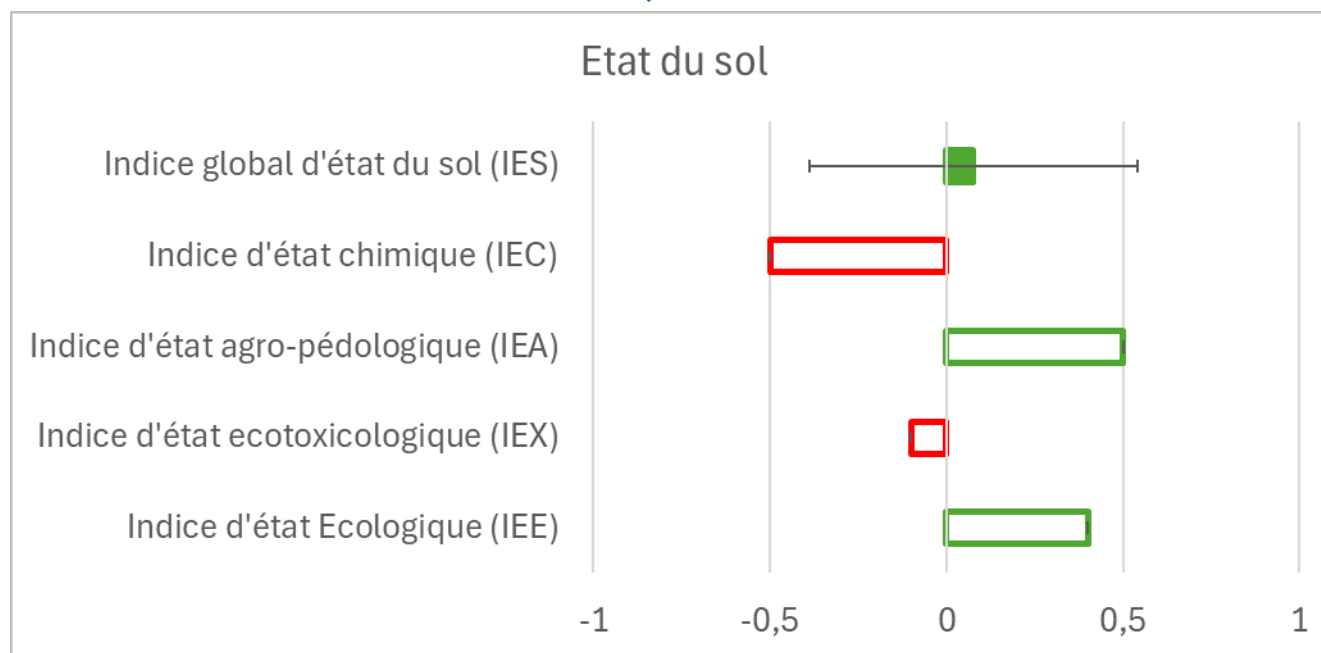
Eq. DIVA 1 : $\tanh(\log(\text{DEG}/\text{REF}))$

Eq DIVA 2 : $(\text{DEG}-\text{REF})/\max(\text{DEG};\text{REF})$

Pondérations +1 ou -1



Etat du sol



**Dégradation par
comparaison à la REF**

**Amélioration par
comparaison à la REF**

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \quad \varphi = \frac{1+\sqrt{5}}{2} \quad n! \sim \sqrt{2\pi n} \left(\frac{n}{e}\right)^n$$

$$\nabla = \hat{x} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{y} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{z} \frac{\partial}{\partial z} \quad \det(A) = \sum_{\sigma \in S_n} \epsilon(\sigma) \prod_{i=1}^n a_{\sigma(i),i}$$

$$\sum_{k=0}^n k = \frac{n(n+1)}{2} \quad B > \frac{1}{T} \int_0^T f(x) dx \quad e^x = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n$$

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} \quad P(A) = \frac{\text{Card}(A)}{\text{Card}(\Omega)} \quad \sum_{n=0}^{\infty} n = -\frac{1}{12}$$

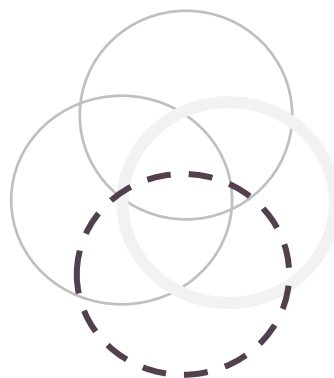
$$A = PDP^{-1} \quad \left(\frac{1}{2}\right)! = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \quad \binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

$$\int_a^b f(x) dx = \lim_{n \rightarrow +\infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n f\left(a + k \frac{b-a}{n}\right)$$

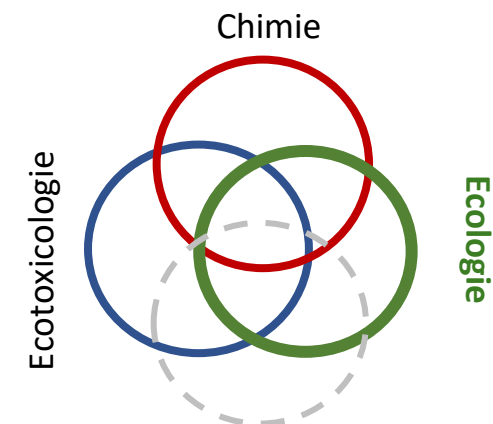
$$f'(a) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(a+h) - f(a)}{h} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-x^2} dx = \sqrt{\pi}$$

Simplification du calcul pour caractériser l'état d'un sol par comparaison à un état de référence

- Indices d'état d'un sol
- Trajectoires de réhabilitation



Apports de l'agro-pédologie ?



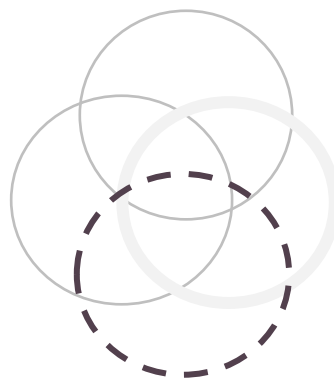
Choix d'un éventail d'indicateurs pour les différents volets Chimie, Ecotoxicologique et écologique

CHIMIE	ETM sur brut ETM extractible (CaCl ₂) ETM (ESCARGOT) ETM MONOCOT EX SITU ETM DICOT EX SITU PHYTOACC MELANGE	ECOTOXICOLOGIE	Toxicity point sur brut Toxicity point sur extractible Toxicity point sur escargots Toxicity point sur monocots ex situ Toxicity point sur dicots ex situ Toxicity point in situ (phytoacc) Croissance_nématodes Repro_nématodes Survie_nématodes	ECOLOGIE	Recouvrement végétal Richesse des communautés floristiques Richesse spécifique (acariens) Richesse spécifique (bactéries) Richesse spécifique (champignons) Richesse spécifique (collemboles) Nématodes (indice de structure) Score final (nématodes) Biomasse microbienne Microrespiration basale Microrespiration induite qCO ₂ basale NAG Arylsulfatase Betaglucosidase Urease Phosphatase
---------------	--	-----------------------	---	-----------------	--

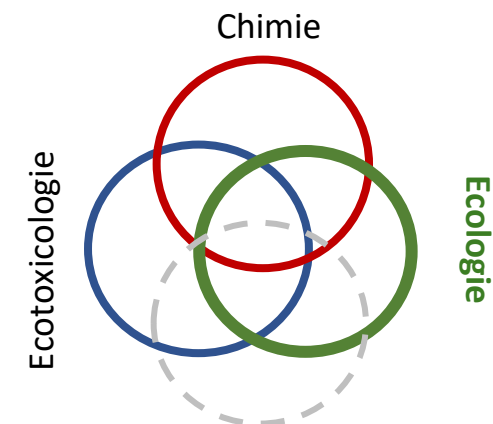
Les indicateurs sélectionnés

Simplification du calcul pour caractériser l'état d'un sol par comparaison à un état de référence

- Indices d'état d'un sol
- Trajectoires de réhabilitation



Apports de l'agro-pédologie ?



Choix d'un éventail d'indicateurs pour les différents volets Chimie, Ecotoxicologique et écologique

Création d'un **outil en ligne pour caractériser la santé d'un sol** (*Open access à venir – 2026*)

Charger un fichier excel

Drag and drop file here
Limit 200MB per file

Browse files

BD_DIVA_Donnees_Brut...
103.4KB

Choix du site

Site

Bordeaux Pierre Bénite Saint Chamond

Choix de l'année

Année

2022 2023 2024

Choix du traitement

Quel traitement souhaitez-vous comparer au site de référence ?

Miate

Choix de la référence

Quel est le site de référence ?

SiteRef

Bienvenue sur le calculateur d'indicateurs DIVA

? Choix du site, de l'année et du traitement

Voir les données

Type de données

Chimie Ecotoxicologie Ecologie Agro-pédologie

Variable	AGREG	INTITULE	TOPIC	Sens_equation	Pb_2023_Miate	Pb_2023_SiteRef	EEF
AZOTE	AZOTE	% azote total	Agro-pédologie	positif	0.461	0.344	-0.2947
MO	MO	% matière organique total	Agro-pédologie	positif	7.84	6.79	-0.1428
P205_OI	P205_OI	Phosphore biodisponible (Olsen)	Agro-pédologie	positif	194.359	48.136	-0.8844
pH_eau	pH_eau	pH (eau)	Agro-pédologie	positif	7.62	8.16	0.0684
CEC	CEC	CEC	Agro-pédologie	positif	15.94	17.84	0.1121
C_N	C_N	C/N	Agro-pédologie	néгатif	9.89	11.48	0.148
C_fraction0_50	C_fraction0_50	%Corg fraction 0-50	Agro-pédologie	positif	40.7	70.3	0.4979
C_fraction50_2000	C_fraction50_2000	%Corg fraction 50-2000	Agro-pédologie	positif	59.3	29.7	-0.5989
C_N_fraction0_50	C_N_fraction0_50	C/N fraction 0-50	Agro-pédologie	positif	6.4	10.1	0.427
C_N_fraction50_200	C_N_fraction50_200	C/N fraction 50-200	Agro-pédologie	positif	15.7	16.7	0.0617

Filtres des variables à représenter

Chimie

Ecotoxicologie

Ecologie

Agro-pédologie

Variables disponibles

ETM extractible (CaCl2) ETM MONOCOT... Croissance_ném... Toxicity point su... Toxicity point su... Richesse des co... Ratio micreresp... Arylsulfatase % azote total % matière organ... Phosphore biodi... CEC %Corg fraction 0... %Corg fraction 5...

Données

Fiche identité détaillée

Fiche identité globale

Quelle est la méthode d'aggrégation des données ?

min moyenne médiane

Données chimiques

INTITULE	EEF	std
ETM MONOCOT EX SITU	-0.0419	0.0736
ETM extractible (CaCl2)	-0.2281	0.406

Données écotoxicologiques

INTITULE	EEF	std	None
Croissance_nématodes	0.0598	None	
Toxicity point sur escargots	-0.894	None	
Toxicity point sur extractible	-0.4716	None	

Données écologiques

INTITULE	EEF	std	None
Arylsulfatase	-0.3951	None	
Ratio micrerespiration basale	-0.0063	None	

Afficher les valeurs

Fiche identité du site Pierre Bénite en 2023 - Traitement Miate

CHIMIE

ETM MONOCOT EX SITU

ETM extractible (CaCl2)

ECOTOXICOLOGIE

Croissance_nématodes

Toxicity point sur escargots

Toxicity point sur extractible

ECOLOGIE

Arylsulfatase

Ratio micrerespiration basale/mduite

Richesse des communautés floristiques

General



Site réhabilité

pH (eau) : 7,6

Texture : sl



Site témoin

pH (eau) : 8,2

Texture : ls

Pierre-Bénite





Site réhabilité

pH (eau) : 7,6

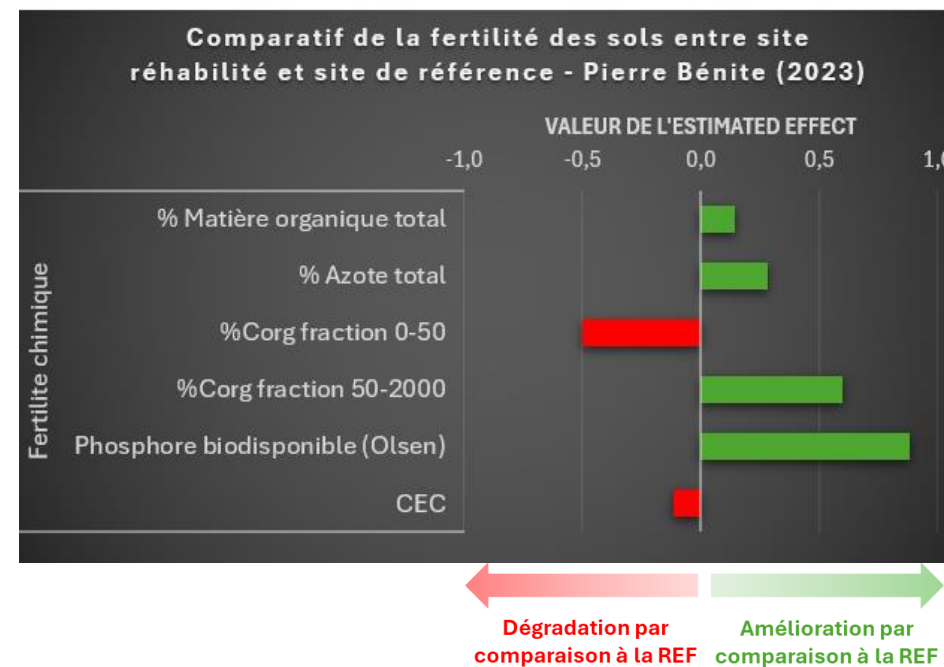
Texture : sl



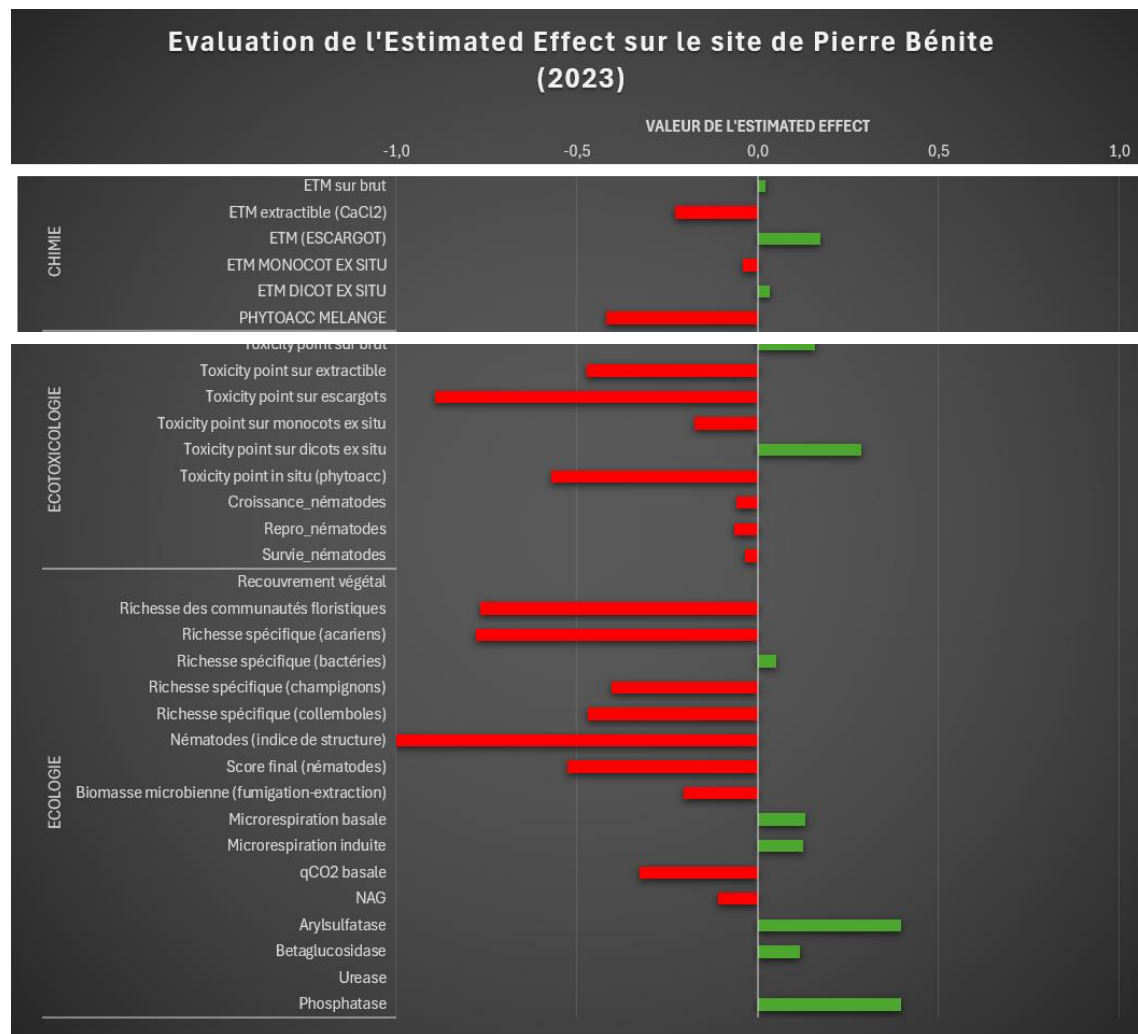
Site témoin

pH (eau) : 8,2

Texture : ls



- Agro-pédologie : préalable à l'application de la Triade-DIVA
- Fertilité différente entre site de référence et site réhabilité
- Humification de la matière organique plus importante sur le site de référence

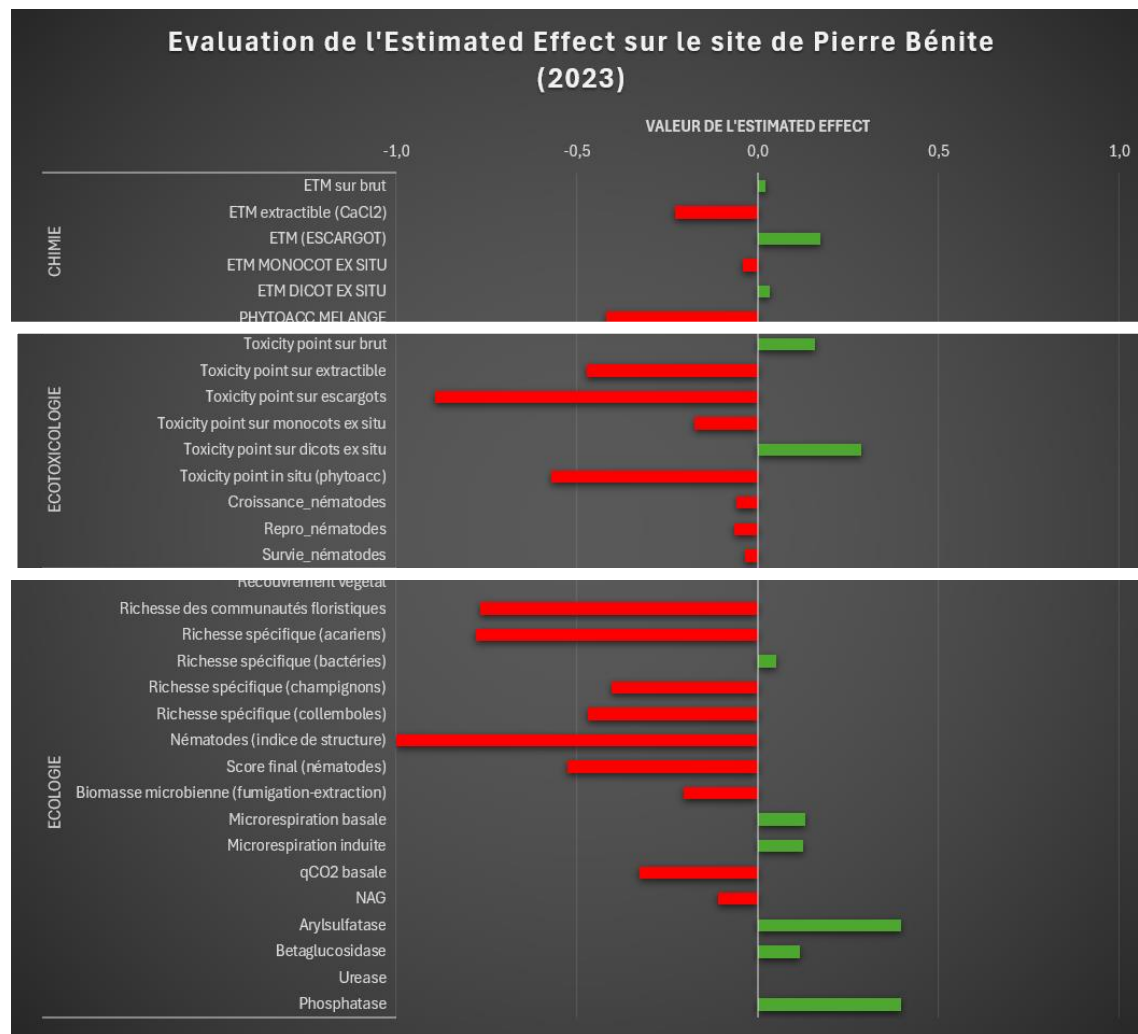


Chimie

Contamination faible sur sol réhabilité mais potentiellement plus mobile

Tendance à l'accumulation dans/sur le végétal vue avec Phytoacc





Chimie

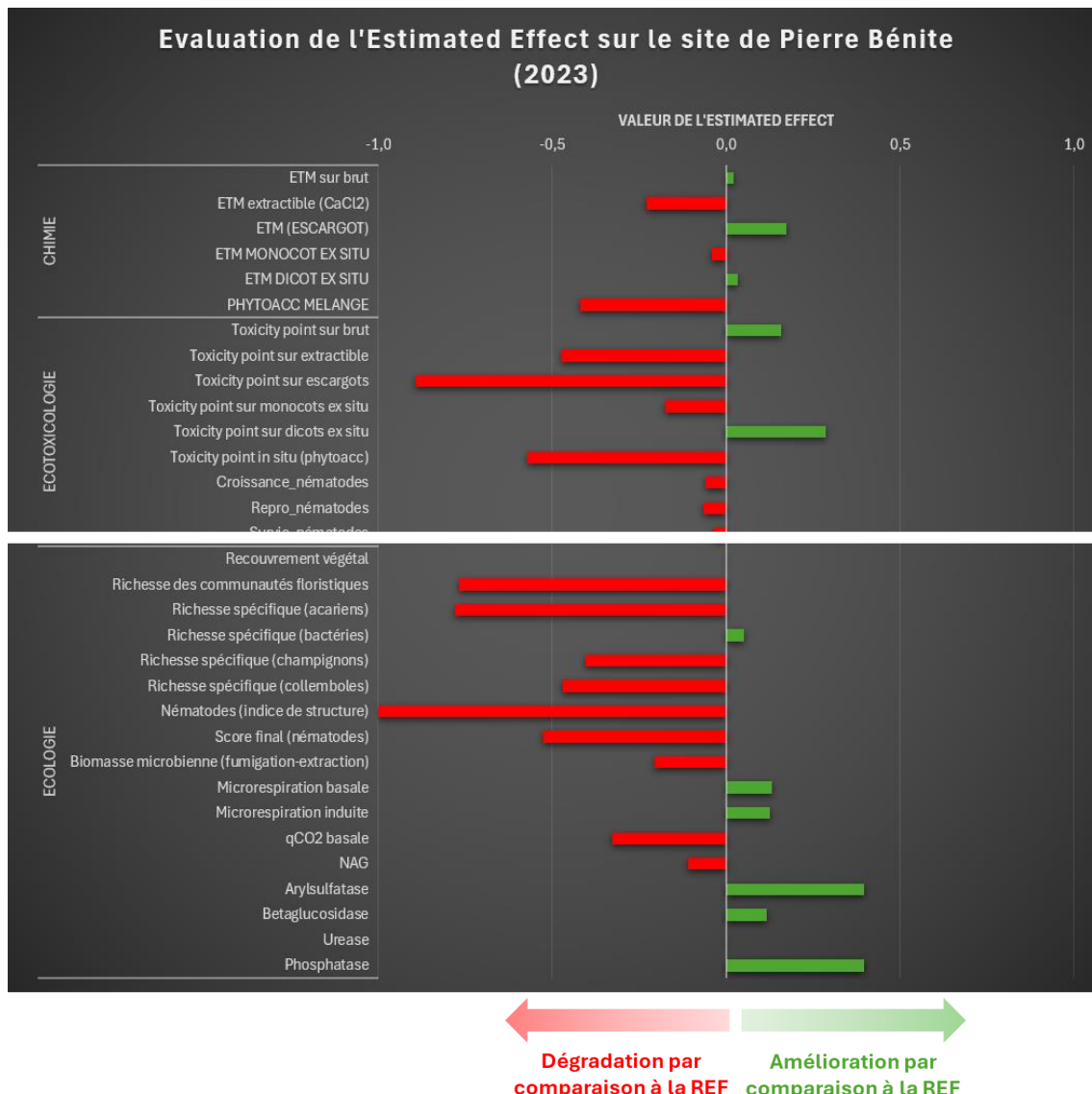
Contamination faible sur sol réhabilité mais potentiellement plus mobile

Tendance à l'accumulation dans/sur le végétal vue avec Phytoacc

Ecotoxicologie

Effet écotox encore marqué sur le site réhabilité notamment les escargots





Chimie

Contamination faible sur sol réhabilité mais potentiellement plus mobile

Tendance à l'accumulation dans/sur le végétal vue avec Phytoacc

Ecotoxicologie

Effet écotox encore marqué sur le site réhabilité notamment les escargots

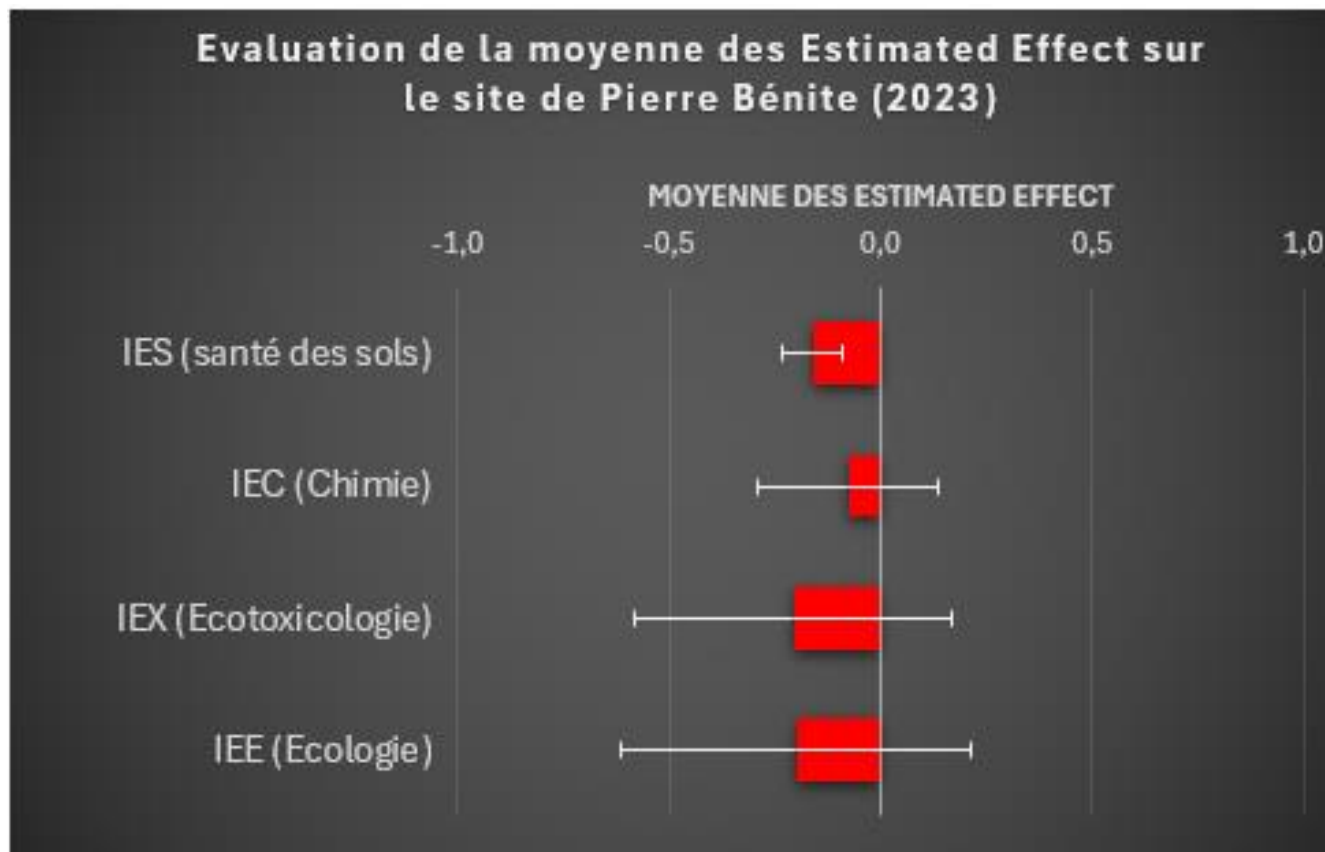
Ecologie

Richesse en organismes des sols très limitée par rapport au site de référence excepté pour les bactéries

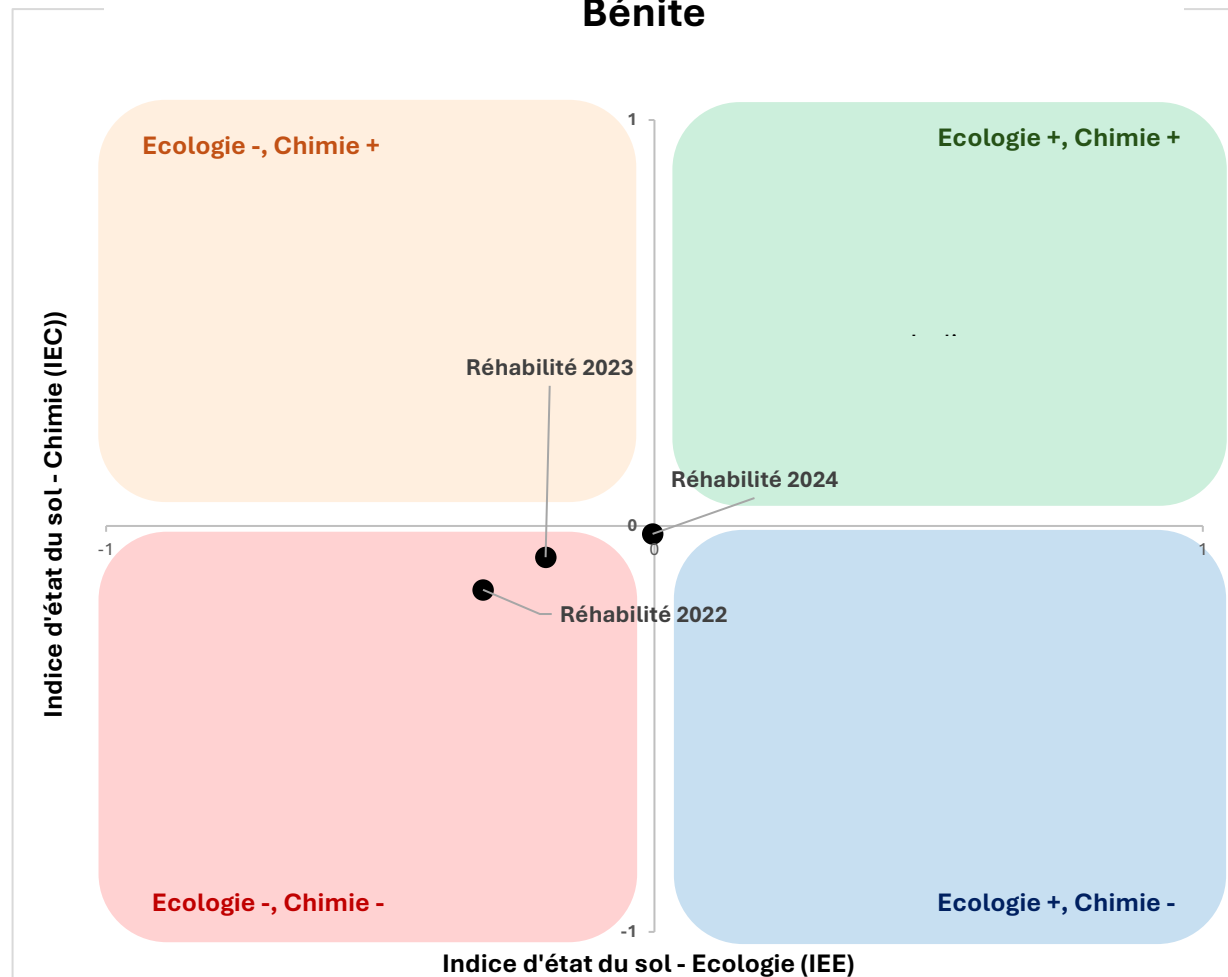
Activité enzymatique des sols très importante sur le site réhabilité notamment liée à la teneur élevée en nutriments

Indice de structure (nématode) très faible (complexité du réseau trophique limitée) sur site réhabilité

Synthèse des résultats pour le site de Pierre Bénite (2023)



Trajectoire de réhabilitation sur le site de Pierre-Bénite

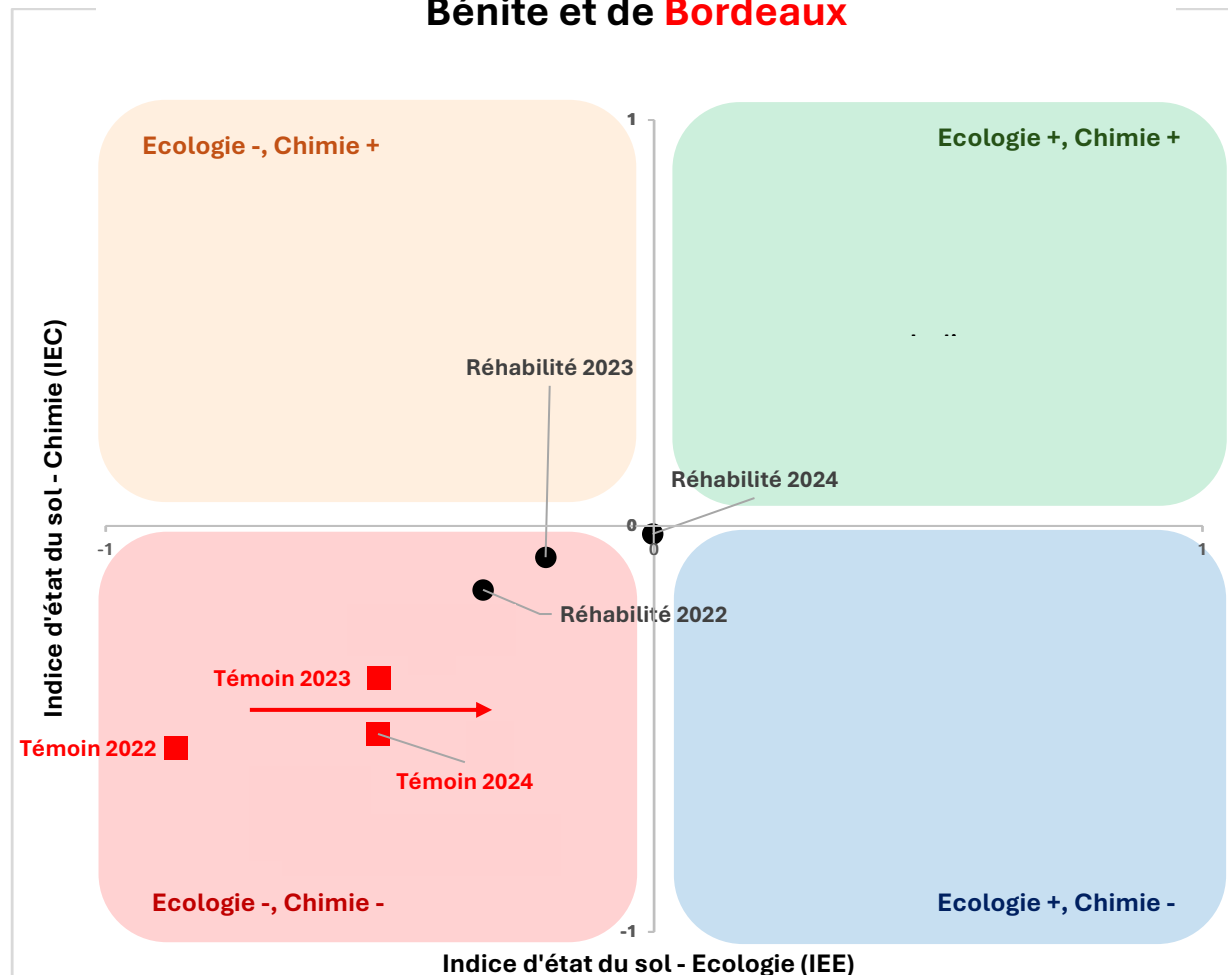


Pierre-Bénite

Le site réhabilité présente des caractéristiques écologiques similaires au site de référence en 2024

⚠ Lecture de ce graphe ne peut se faire sans analyse des graphes antérieurs
→ notamment **une plus faible richesse spécifique** et un métabolisme piloté par **une fertilité très importante** sur le site réhabilité

Trajectoire de réhabilitation sur le site de Pierre-Bénite et de **Bordeaux**



Pierre-Bénite

Le site réhabilité présente des caractéristiques écologiques similaires au site de référence en 2024

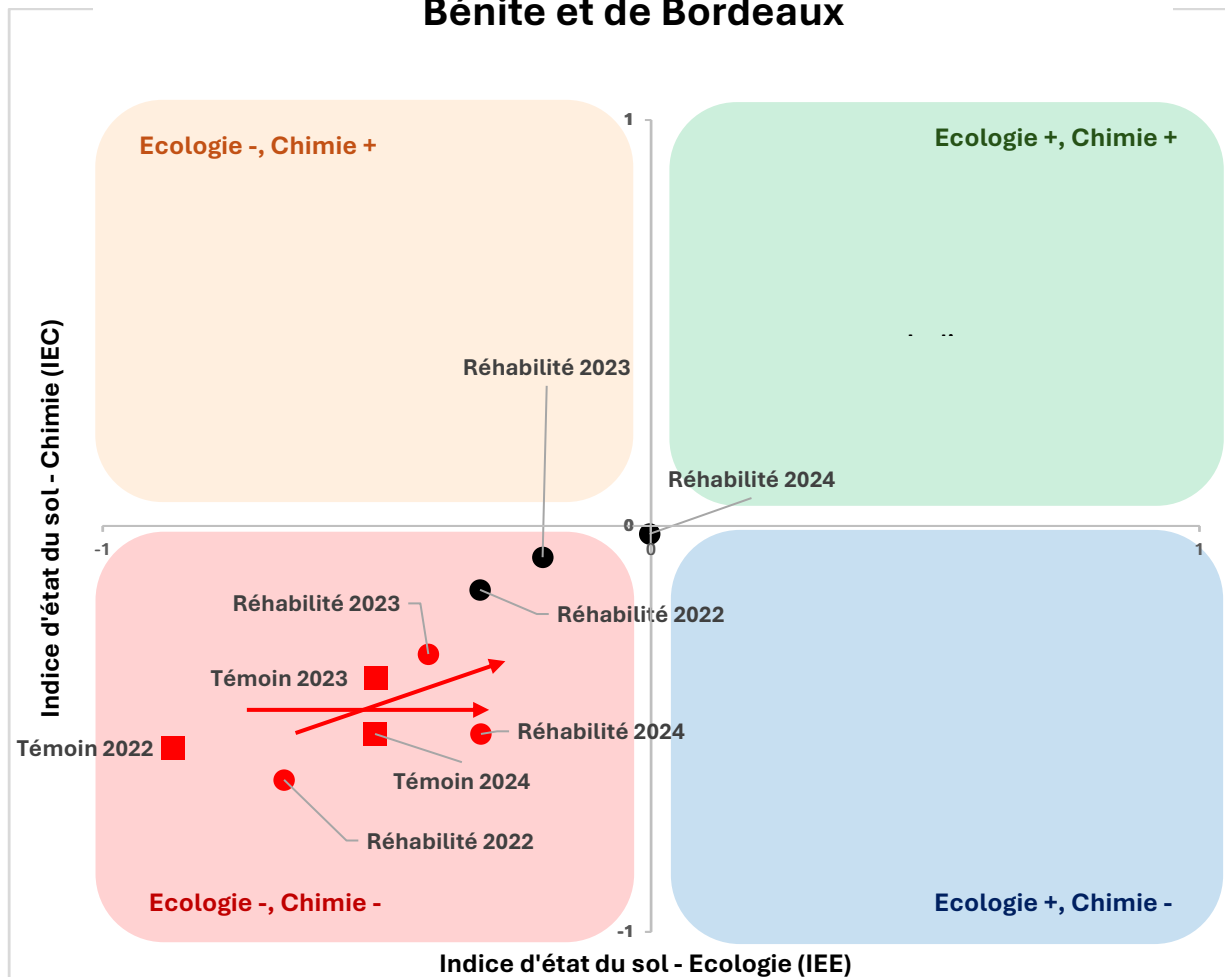
⚠ Lecture de ce graphe ne peut se faire sans analyse des graphes antérieurs
→ notamment **une plus faible richesse spécifique** et un métabolisme piloté par **une fertilité très importante** sur le site réhabilité

Bordeaux (compost et témoin positif)

Le site réhabilité présente une évolution des caractéristiques écologiques au fil du temps.

Cette amélioration est principalement pilotée par la **biodiversité des sols** qui s'accroît avec le temps.

Trajectoire de réhabilitation sur le site de Pierre-Bénite et de Bordeaux



Pierre-Bénite

Le site réhabilité présente des caractéristiques écologiques similaires au site de référence en 2024

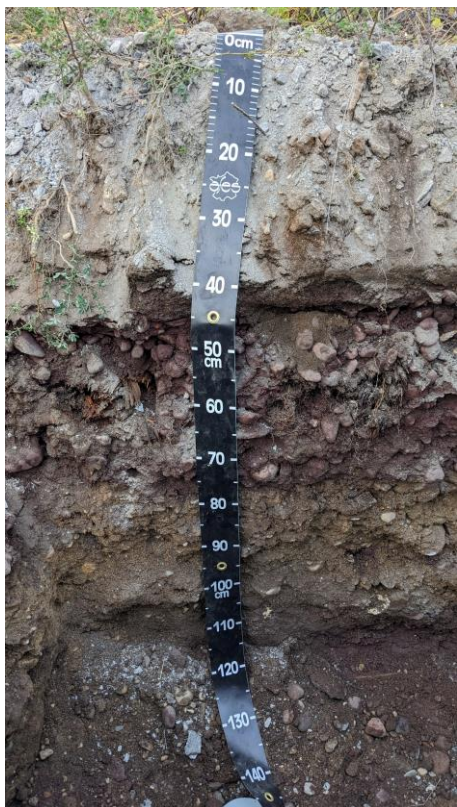
⚠ Lecture de ce graphe ne peut se faire sans analyse des graphes antérieurs
→ notamment **une plus faible richesse spécifique** et un métabolisme piloté par **une fertilité très importante** sur le site réhabilité

Bordeaux (compost et témoin positif)

Le site réhabilité présente une évolution des caractéristiques écologiques au fil du temps.

Cette amélioration est principalement pilotée par la **biodiversité des sols** qui s'accroît avec le temps.

- L'approche DIVA – TRIADE est pertinente pour suivre la réhabilitation d'un site sur la base d'un éventail d'indicateurs apportant une vision complète des sols (contamination et refonctionnalisation) – « **Faisceaux d'évidence** »
- L'interprétation qui en est faite doit toujours considérer **en amont** d'éventuelles différences en termes de qualité physique et chimique des sols (site de référence / site réhabilité)
- Lors d'un **suivi**, le site de référence doit être investigué au même titre que le site réhabilité en raison **d'importantes variations interannuelles** (écologie)
- Cet outil est **cohérent et complémentaire** à l'approche risque TRIADE
- L'outil sera mis à disposition d'ici **2026** pour tout utilisateur souhaitant établir un suivi sur la base de la TRIADE-DIVA.



Site réhabilité

pH (eau) : 8,33

Texture : S (H1), A
(H2), S (H3)



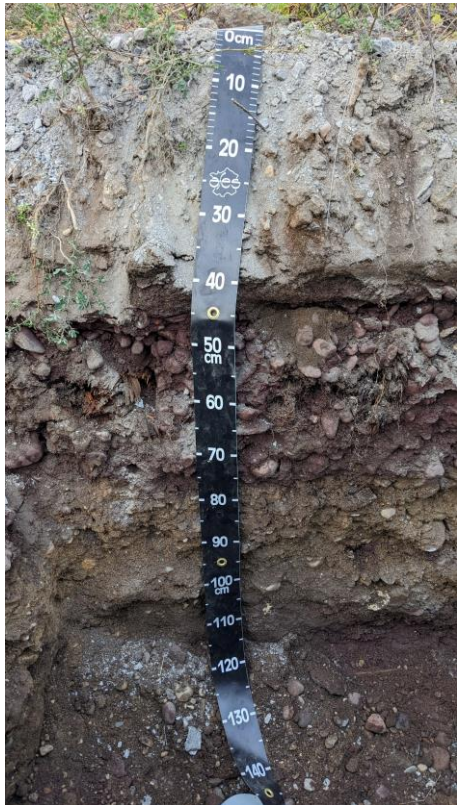
Site témoin

pH (eau) : 8,47

Texture : S (variées)

Bordeaux





Site réhabilité

pH (eau) : 8,33

Texture : S (H1), A
(H2), S (H3)

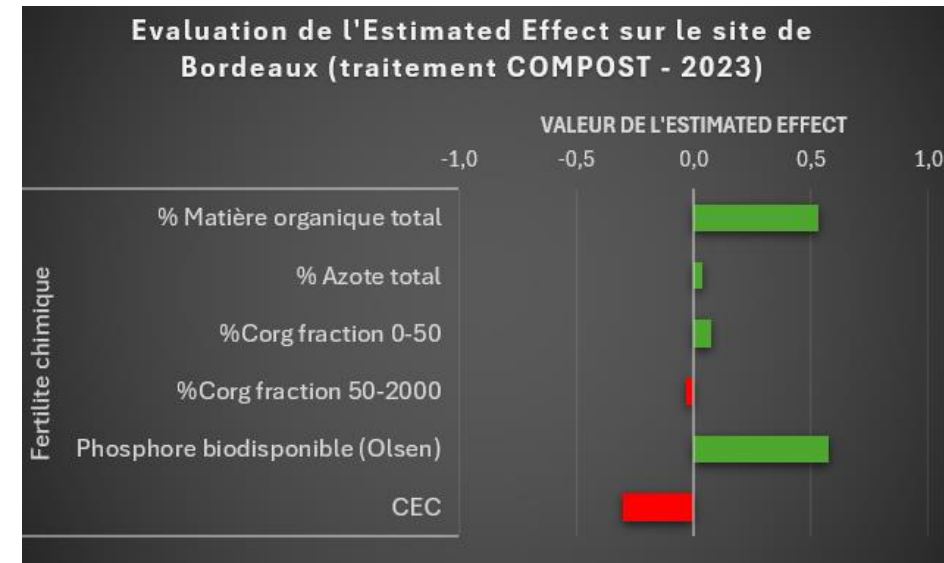
General



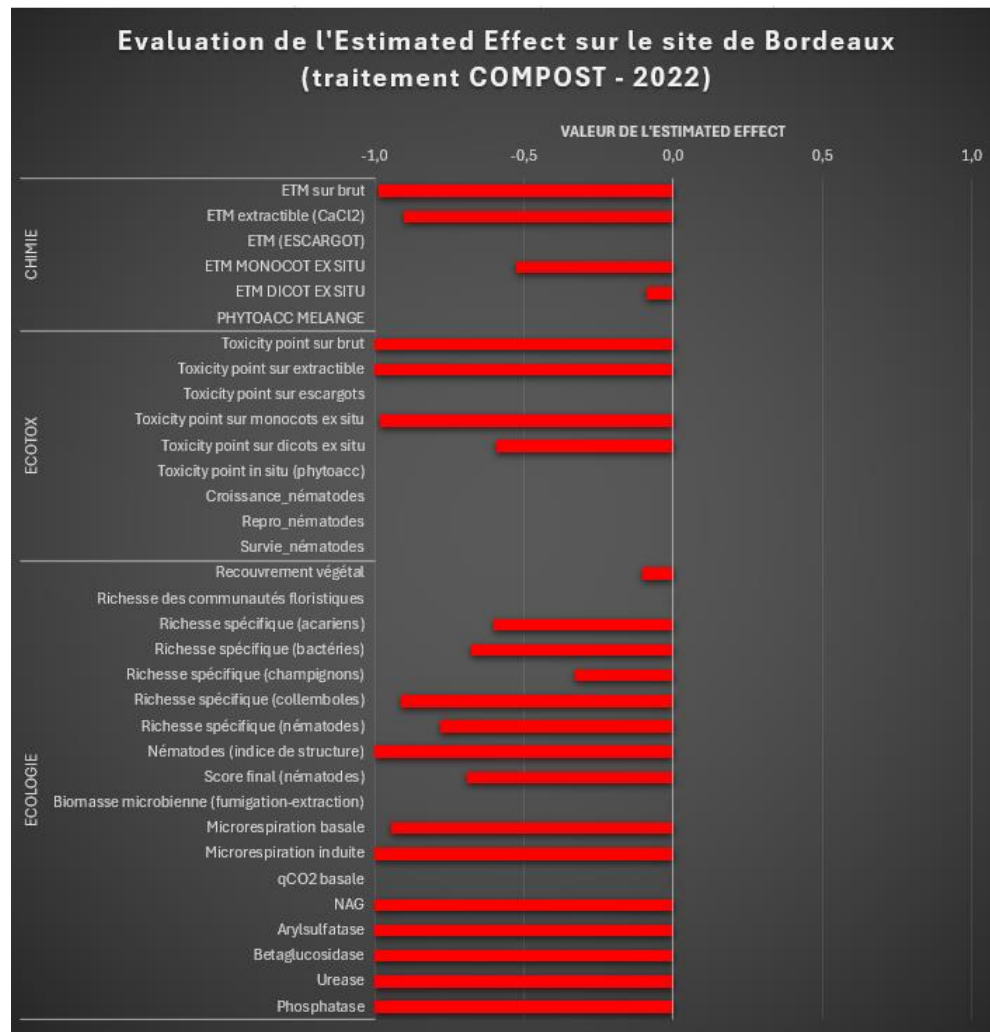
Site témoin

pH (eau) : 8,47

Texture : S (variées)



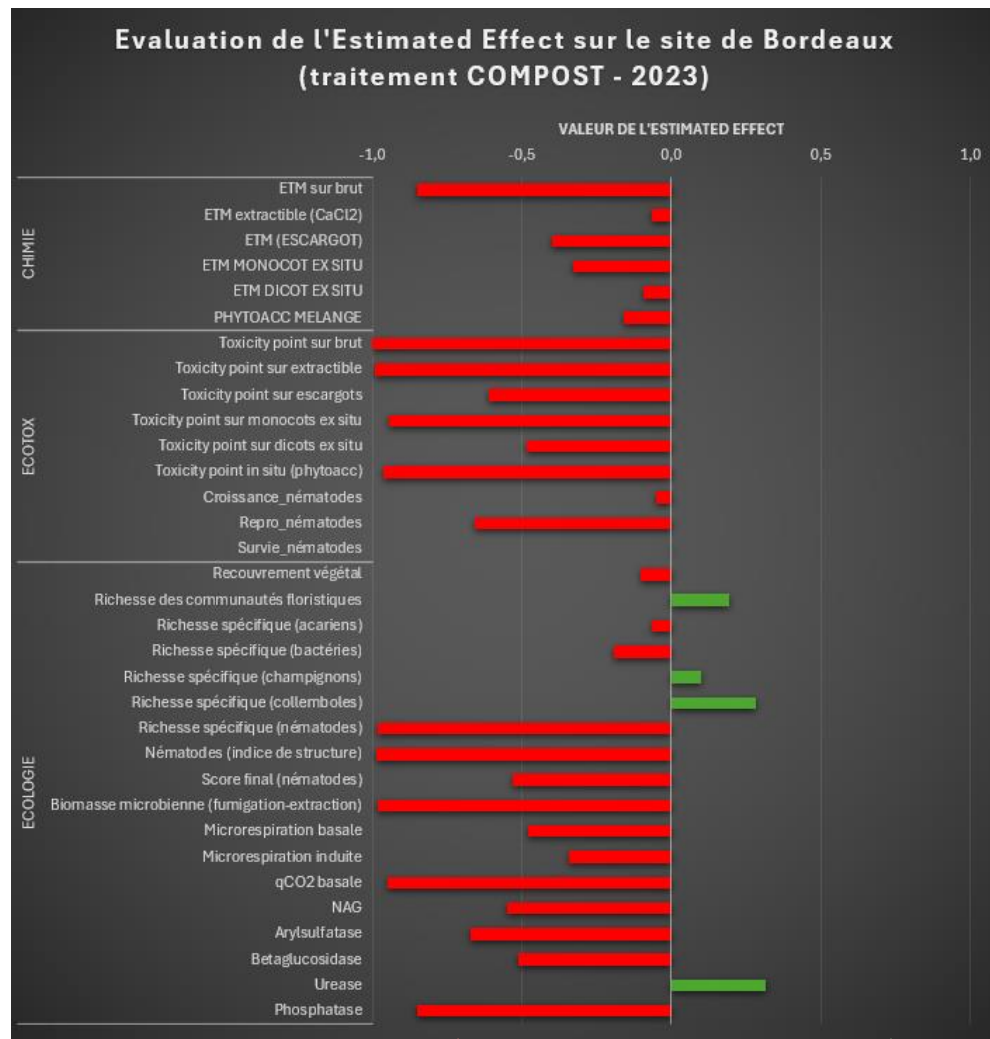
← Dégradation par comparaison à la REF → Amélioration par comparaison à la REF →



2022

Dégradation par
comparaison à la REF

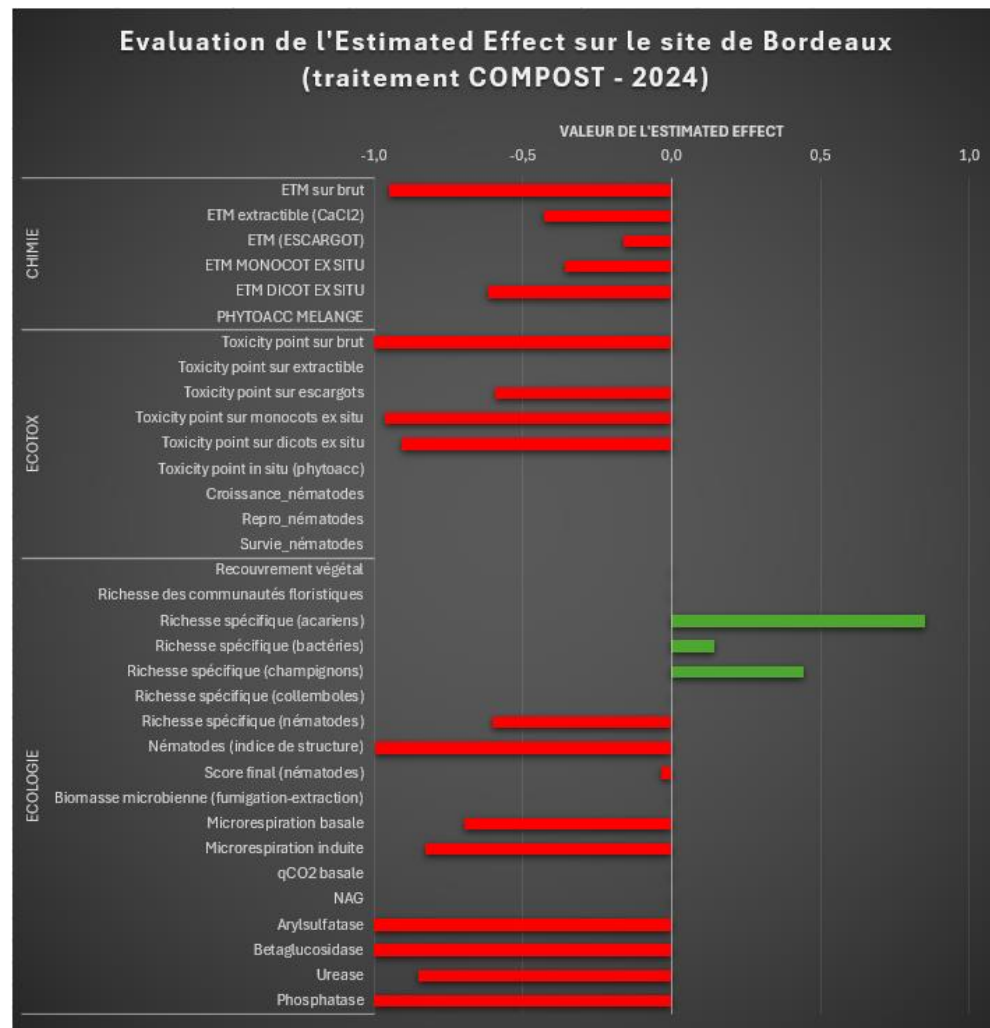
Amélioration par
comparaison à la REF



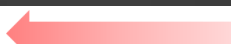
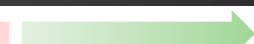
2023

Dégradation par
comparaison à la REF

Amélioration par
comparaison à la REF

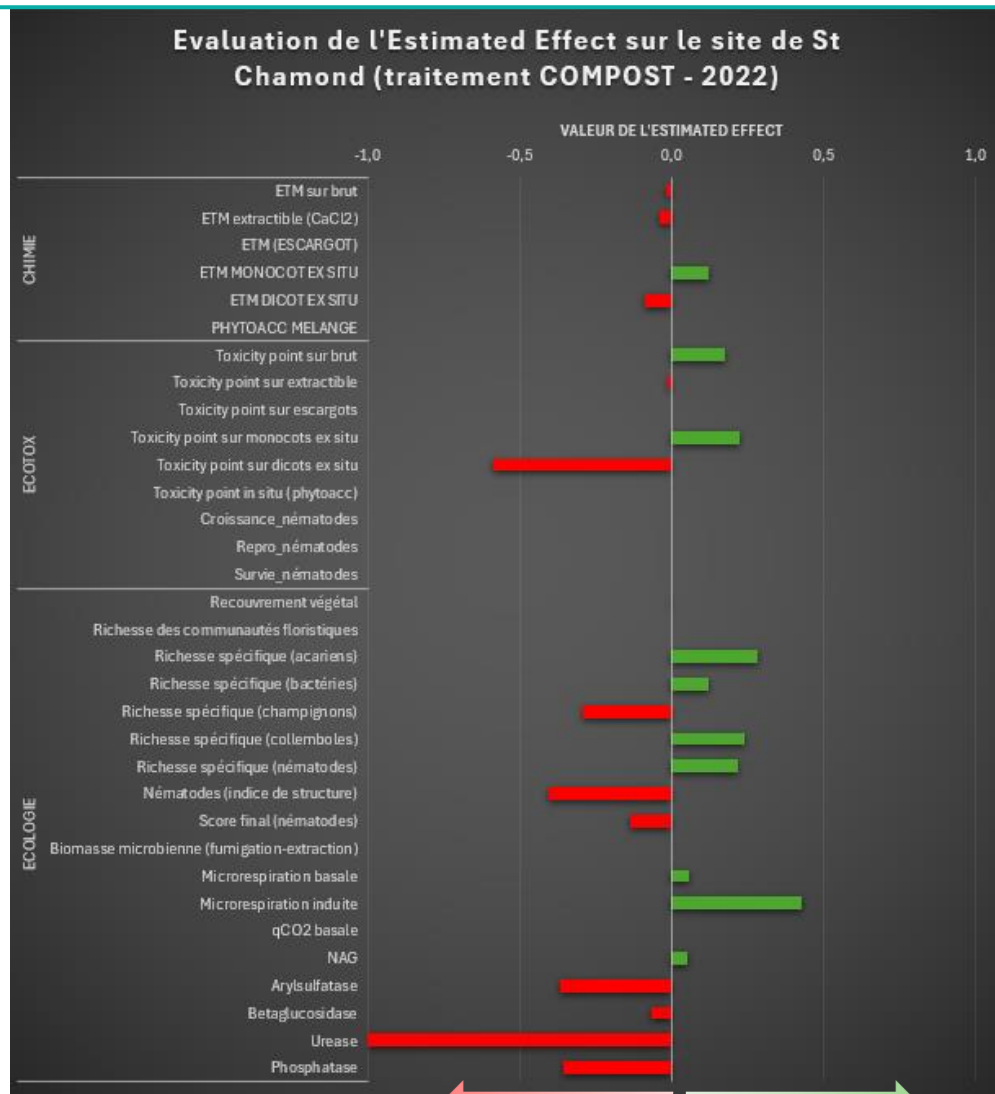


2024

Dégradation par
comparaison à la REF
 Amélioration par
comparaison à la REF

Rendus de l'outil TRIADE-DIVA

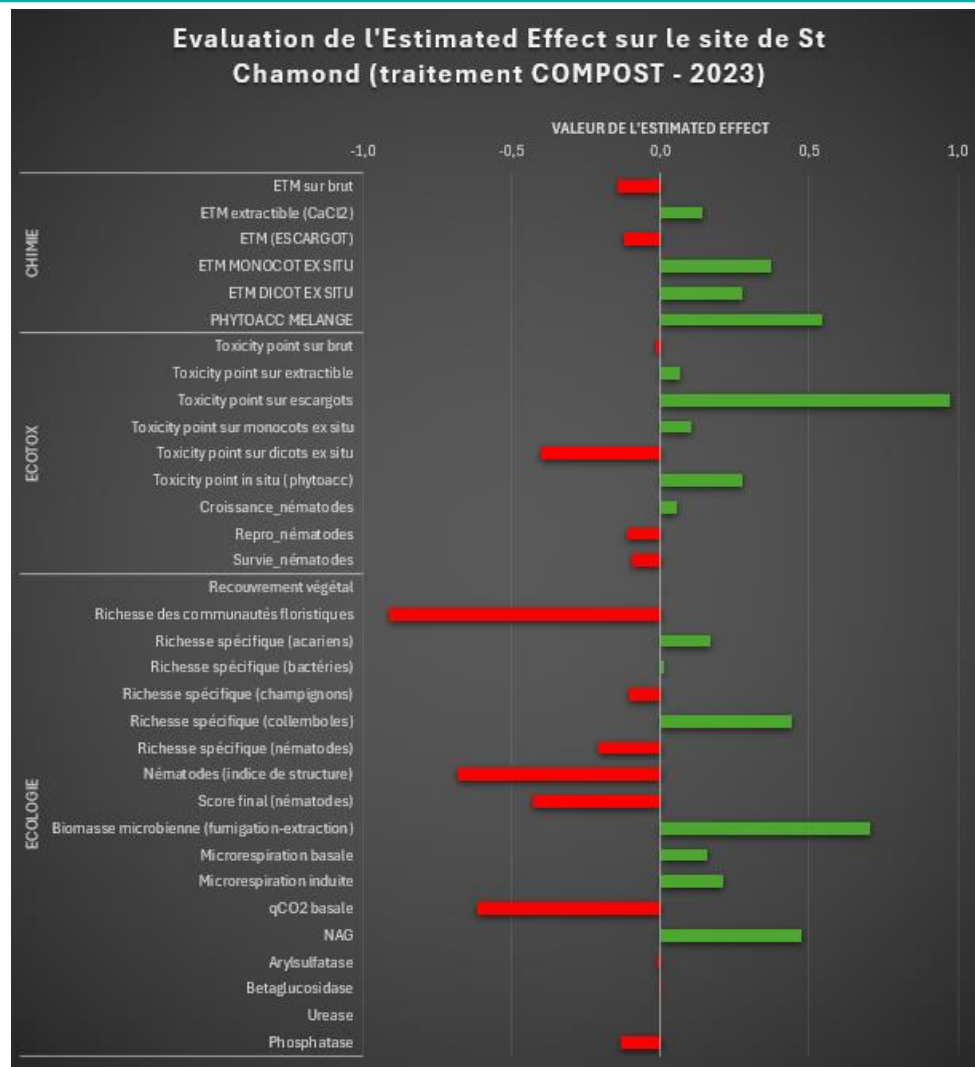


2022

Dégradation par
comparaison à la REF

Amélioration par
comparaison à la REF

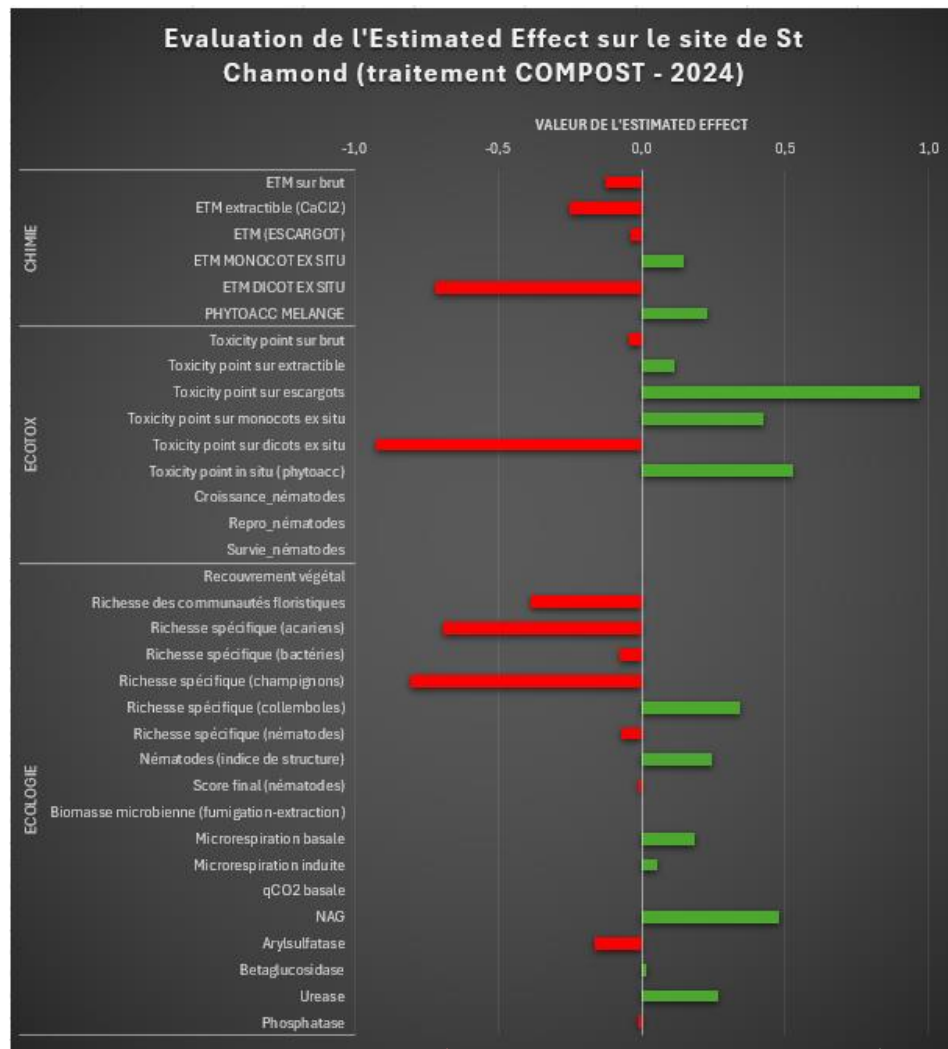
Rendus de l'outil TRIADE-DIVA



2022

Dégradation par
comparaison à la REF

Amélioration par
comparaison à la REF



2024



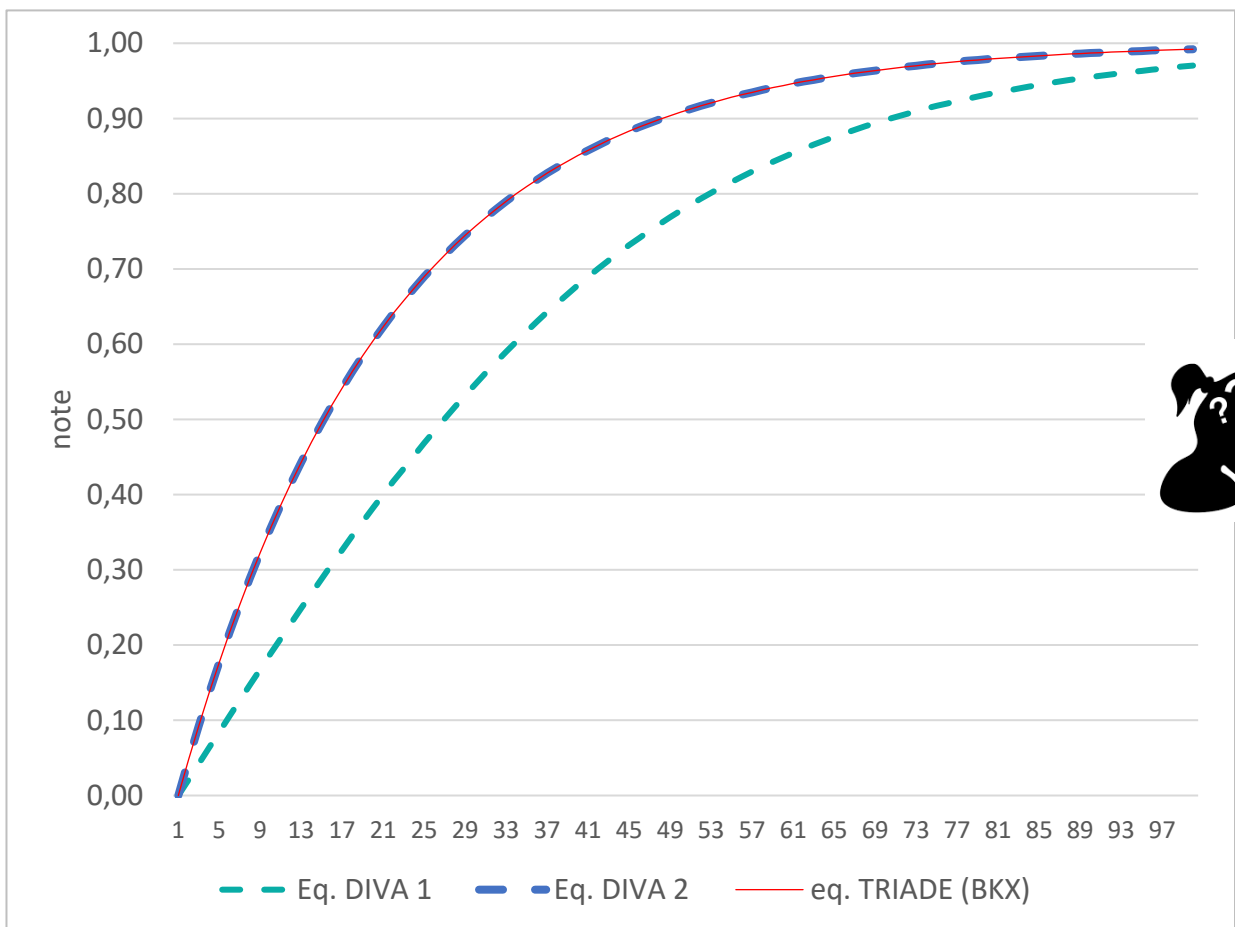

Dégradation par
comparaison à la REF
 Amélioration par
comparaison à la REF

Validité de l'équation proposée (exemples)

Cas 1 : charge polluante effet cocktail (ATSDR)

Site dégradé : 10 000 -> > 1 000 000

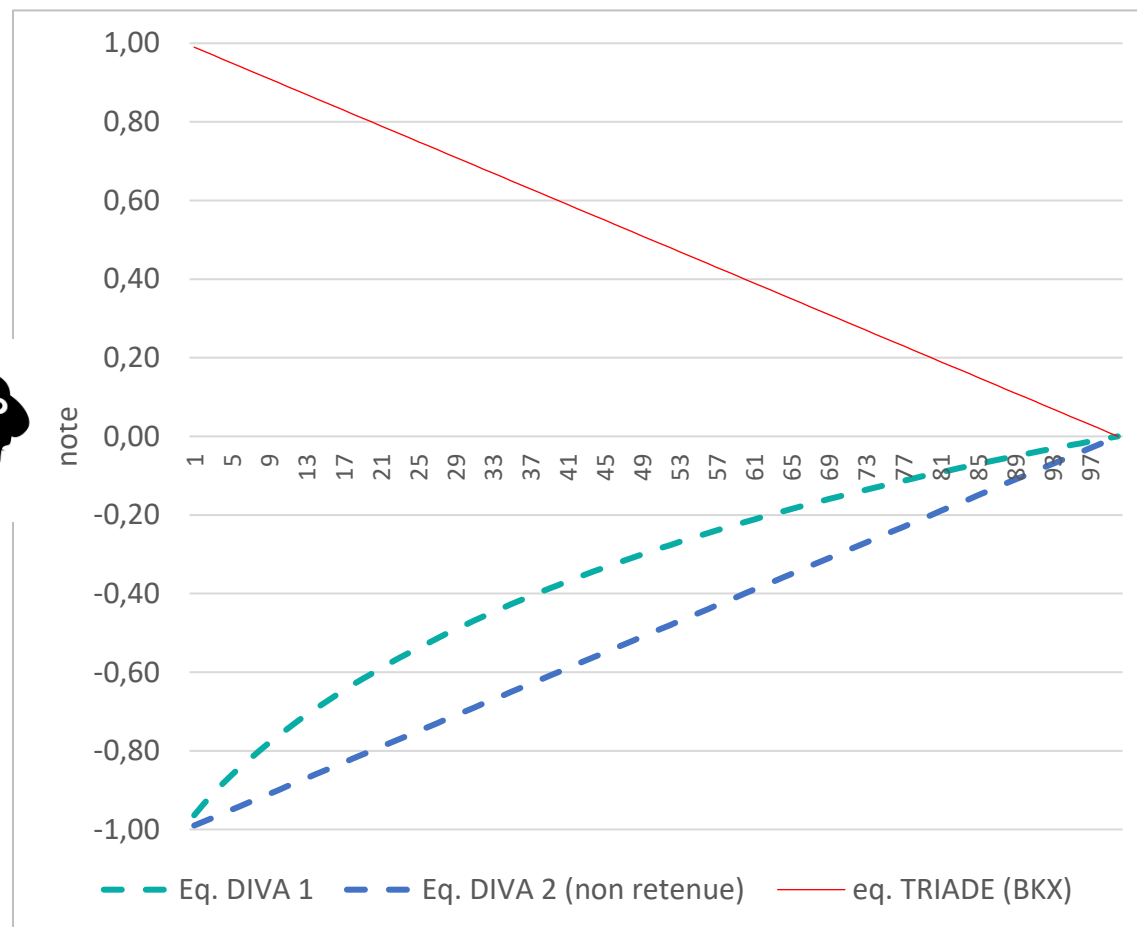
Site Référence : 10 000



Cas 2 : Couverts végétaux

Site dégradé : 1 -> 100 (%)

Site Référence : 100%



Les enseignements issus des bioindicateurs

