



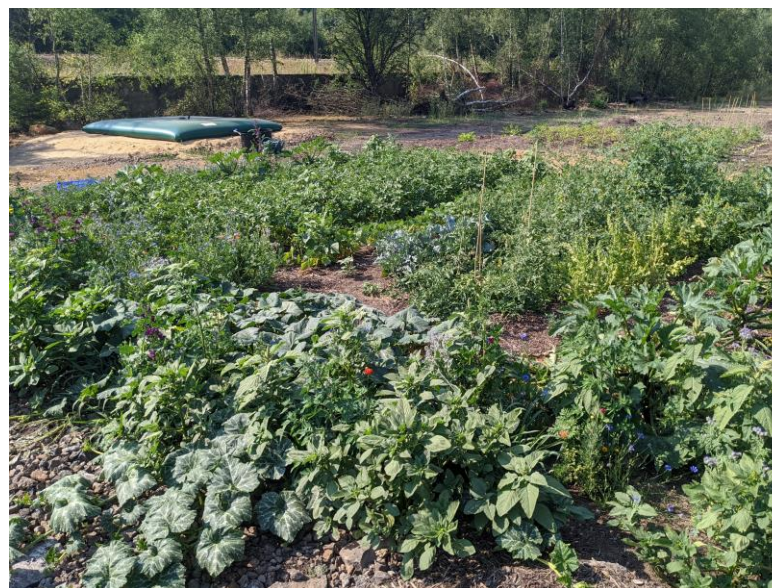
# Reconversion d'une friche sidérurgique en ferme urbaine : Ingénierie pédologique et essais pilotes in situ (Projet « Rout Lëns »)

Gaylord Erwan MACHINET, Aurore JACQUOT, Jean-Christophe RENAT

Intersol, Lille, 28/03/2023



1



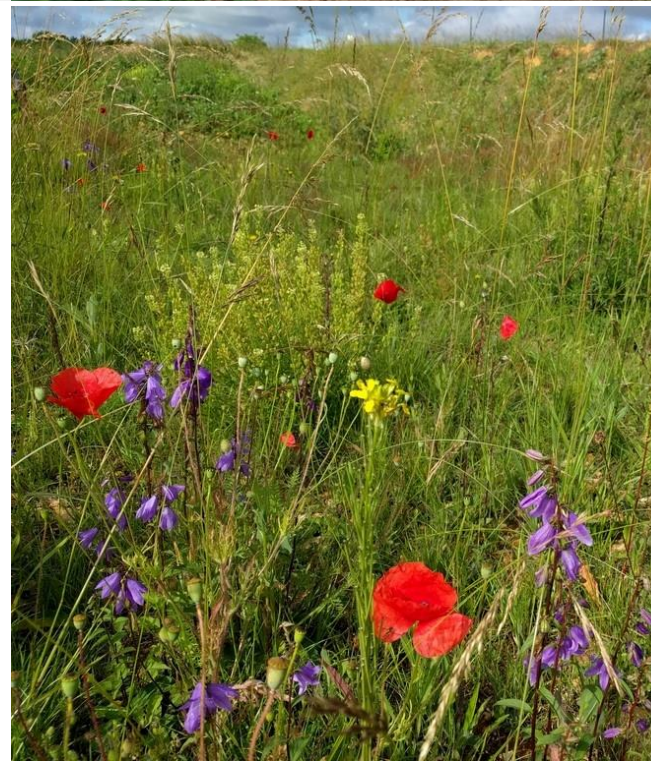




# Microhumus : nos activités sur les sols

Ingénierie pédologique  
&  
Gestion par phytomanagement des sols  
dégradés et pollués

- **Formulation d'amendements**
- **Amélioration** des sols agricoles
- **Refonctionnalisation** de sols en milieux arides désertiques
- **Restauration** de sols sur friches industrielles
- **Création de sols** sur friches à base de matériaux inertes
- **Réhabilitation** de carrière
- **Formulation de terre végétale**
- **Gestion par phytomanagement** des sols pollués



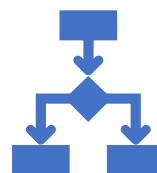


# Plan

*“Reconversion d’une friche  
sidérurgique en ferme urbaine :  
ingénierie pédologique et essais  
pilotes in situ”*



Le phytomanagement



Le procédé AgroPhyto<sup>®</sup>



Cas d’application





# Le phytomanagement

---

**Le phytomanagement est une approche de gestion intégrée d'un site dégradé ou délaissé, qui fait appel à un ensemble de techniques utilisant les végétaux (les phytotechnologies) pour maîtriser la pollution des sols et redonner de la valeur au site.**





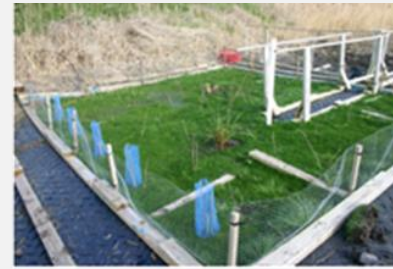
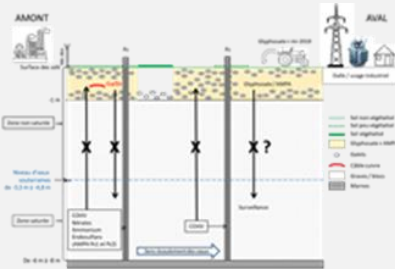
# Les « phytotechnologies » en quelques mots

- **Définition :**
  - « Ensemble de techniques qui utilisent in situ des espèces végétales pour extraire, contenir ou dégrader des polluants inorganiques ou organiques » (Ademe 2012)
- **Une alternative ou un complément** aux techniques conventionnelles dans le cas **de surfaces polluées importantes**
- Par rapport aux techniques traditionnelles, les phytotechnologies améliorent **les services écosystémiques rendus par les sols** (Morel et al. 2015) :
  - Services de régulation
  - Services d'approvisionnement
  - Services culturels

Guide simplifié pour la  
gestion des sites et sols  
pollués par  
phytomanagement



# AgroPhyto®



**ATerPol®**  
Diagnostic

**AgroPhyto\_Essais®**  
Labo

**AgroPhyto\_Pilote®**  
In situ/on site

**AgroPhyto\_Traitement®**  
Parcelle

**AgroPhyto\_Suivi®**  
Sol, eaux, biomasses

- Procédé de gestion alternatif des espaces dégradés et/ou contaminés
- Adapté à différents polluants :  
HCT C5-C40, HAP, BTEX, PCB, Métaux et métalloïdes, Cyanures





# Cas d'application

## Reconversion d'une friche sidérurgique en ferme urbaine : ingénierie pédologique et essais pilotes in situ

Phases :

- Investigations de terrain et diagnostic agro-environnemental
- Essais sous serre
- Pilotes de terrain (en cours)





# Contexte et objectifs



Friche sidérurgique à réhabiliter



Accumulation de laitiers de hauts-fourneaux sur 2,6 m à 3 m (7 250 m<sup>2</sup>)



En avril 2022, avant travaux



En mai 2022, laitiers sidérurgiques excavés pendant les travaux



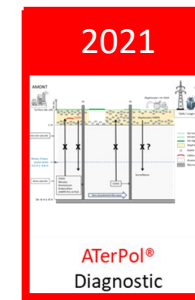
## Objectifs :

- Produire des denrées alimentaires saines sur site
- Construire des sols à partir de la valorisation des matériaux du site

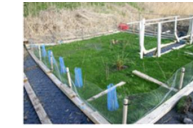




# Etape ATerPol®\_ Diagnostic



AgroPhyto\_Essais®  
Labo



AgroPhyto\_Pilote®  
In situ/on site



AgroPhyto\_Traitement®  
Parcelle



AgroPhyto\_Suivi®  
Sol, eaux, biomasses



## Objectif technique :

Evaluer la faisabilité technique de valorisation des matériaux du site dans la formulation de supports de végétalisation fonctionnels pour la culture maraichère



### 1. Etude documentaire et de terrain

- Description des sols en place
- Caractérisations agro-environnementales des sols en place
- Evaluation de leur phytotoxicité



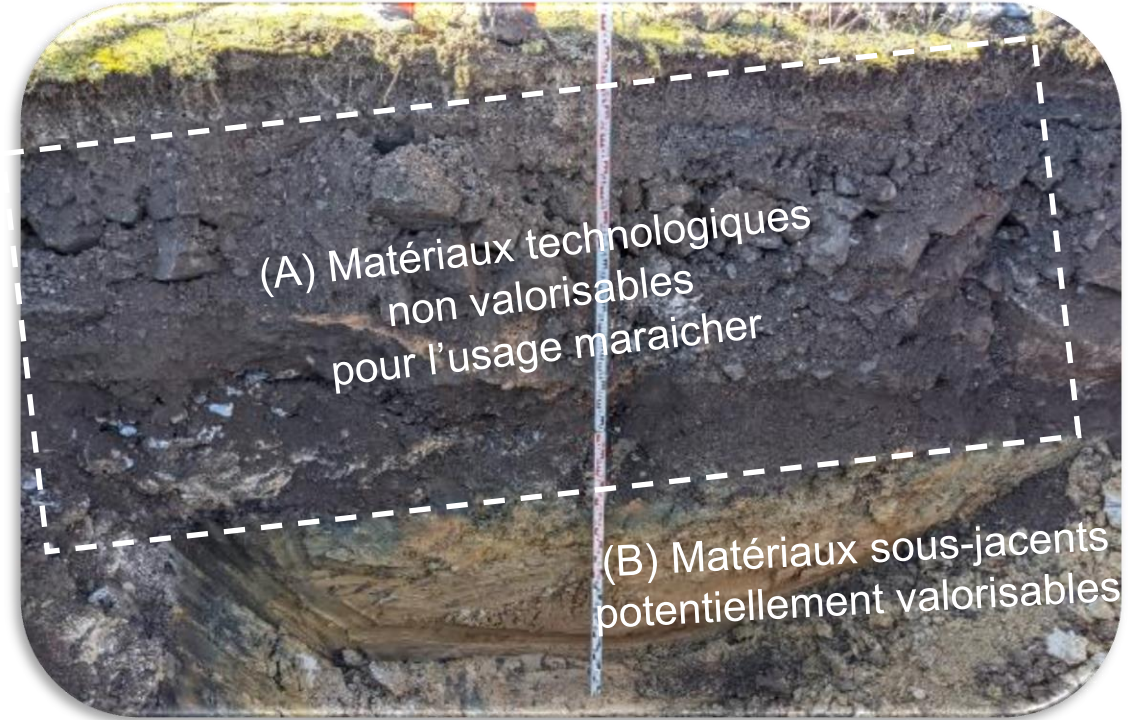
### 2. Ingénierie pédologique

- Identification, caractérisation et sélection d'amendements pour l'ingénierie
- Protocole de refonctionnalisation





8 fosses pédologiques + 1 témoin naturel hors site



Profil de sol

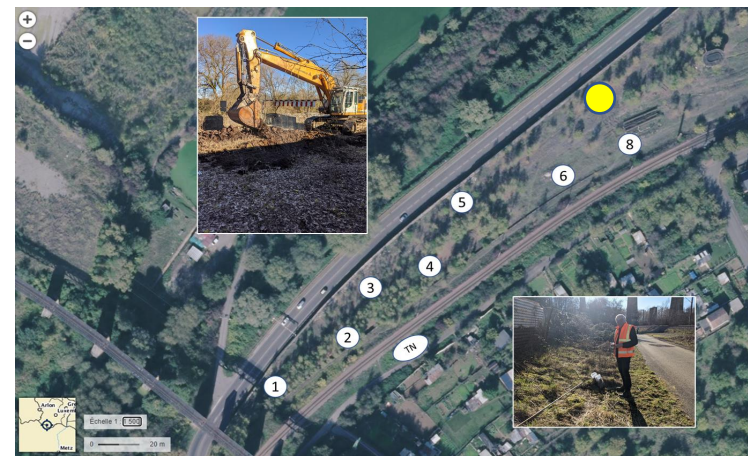




# Caractéristiques environnementales des matériaux naturels du site

IKO		Vallées ferrifères Homécourt - Longwy - Micheville (MOY - MAX)	Terrain naturel	Sondage 1	Sondage 2	Sondage 3	Sondage 4	Sondage 5	Sondage 6	Sondage 7	Sondage 8
			TN	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Cyanures totaux	mg/kg MS	10-20	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	1,1	<0.5
Métaux sur brut											
Arsenic (As)	mg/kg MS	40-200	13	47	33	29	27	29	20	30	16
Cadmium (Cd)	mg/kg MS	2-5	<0.40	<0.40	<0.40	<0.40	<0.40	<0.40	<0.40	0,41	<0.40
Chrome (Cr)	mg/kg MS	80-500	27	50	37	33	34	40	40	37	33
Cuivre (Cu)	mg/kg MS	15-50	9	7	5	6	5	5	15	10	27
Nickel (Ni)	mg/kg MS	30-100	19	32	24	22	23	25	32	22	71
Plomb (Pb)	mg/kg MS	25-100	17	26	22	19	19	16	33	99	36
Zinc (Zn)	mg/kg MS	120-500	58	114	102	78	80	77	79	596	129
Mercure (Hg)	mg/kg MS	0,5-2	<0.10	<0.10	<0.10	0,14	<0.10	0,23	0,15	<0.10	<0.10

→ Conformité aux valeurs de fond géochimique local  
et aux valeurs de référence NF U44-551  
(sauf S7 : Zinc)







# Caractéristiques environnementales des matériaux naturels du site

IKO		GUIDE REFUGE		Terrain naturel	Sondage 1	Sondage 2	Sondage 3	Sondage 4	Sondage 5	Sondage 6	Sondage 7	Sondage 8
		Seuils Agri. Urbaine. IDF										
		VASAU 1 (non contaminé)	VASAU 2	TN	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Métaux sur brut												
Arsenic (As)	mg/kg MS	12	20	13,1	46,8	33,3	29	26,9	29,1	19,8	30	15,5
Cadmium (Cd)	mg/kg MS	0,51	1	<0.40	<0.40	<0.40	<0.40	<0.40	<0.40	<0.40	0,41	<0.40
Chrome (Cr)	mg/kg MS	65,2	130,4	27	50	37	33	34	40	40	37	33
Cuivre (Cu)	mg/kg MS	28	84	9	7	5	6	5	5	15	10	27
Nickel (Ni)	mg/kg MS	31,2	62,4	19	32,4	24	22	23	25	31,5	22	71,1
Plomb (Pb)	mg/kg MS	53,7	100	17	26	22	19	19	16	33	98,6	36
Sélénium (Se)	mg/kg MS	0,31	0,62	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00	<1.00
Zinc (Zn)	mg/kg MS	88	264	58	114	102	78	80	77	79	596	129
Mercure (Hg)	mg/kg MS	0,32	0,64	<0.10	<0.10	<0.10	0,14	<0.10	0,23	0,15	<0.10	<0.10
Hydrocarbures totaux (4 tranches) (C10-C40) sur brut												
Indice Hydrocarbures (C10-C40)	mg/kg MS	69,5	-	19	27	16	40	<15.0	30	48	29	41
Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (16 HAPs) sur brut												
Naphtalène	mg/kg MS	0,02	-	0,057	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0,073	<0.05	0,13
Fluorène	mg/kg MS	0,005	-	<0.05	0,056	<0.05	0,054	<0.05	0,056	0,096	<0.05	0,076
Phénanthrène	mg/kg MS	0,098	-	<0.05	0,07	0,073	0,081	<0.05	0,056	0,17	0,12	0,088
Pyrène	mg/kg MS	0,126	-	0,11	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0,066	<0.05
Benzo-(a)-anthracène	mg/kg MS	0,083	-	0,099	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Chrysène	mg/kg MS	0,09	-	0,12	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Indeno (1,2,3-cd) Pyrène	mg/kg MS	0,061	-	0,086	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.051
Dibenzo(a,h)anthracène	mg/kg MS	0,028	-	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Acénaphthylène	mg/kg MS	0,015	-	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Acénaphène	mg/kg MS	0,005	-	<0.05	<0.05	<0.05	0,079	<0.05	0,065	0,087	<0.05	0,16
Anthracène	mg/kg MS	0,015	-	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Fluoranthène	mg/kg MS	0,166	-	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	0,079	<0.05
Benzo(b)fluoranthène	mg/kg MS	0,103	-	0,12	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.051
Benzo(k)fluoranthène	mg/kg MS	0,053	-	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Benzo(a)pyrène	mg/kg MS	0,094	-	0,087	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05
Benzo(ghi)Pérylène	mg/kg MS	0,091	-	0,079	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	<0.051
Somme des HAP	mg/kg M.S.	1,053	-	0,76	0,13	0,073	0,21	<0.05	0,18	0,43	0,27	0,45



→ Restrictif  
→ VASAU 1 à adapter en fonction du FPGL



# Caractéristiques agronomiques des matériaux naturels du site

IKO		Terrain naturel	Sondage 1	Sondage 2	Sondage 3	Sondage 4	Sondage 5	Sondage 6	Sondage 7	Sondage 8
		TN	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
Refus à 2 mm	%	5	18	15	39	46	16	22	17	29
<b>Fractionnement granulo-densimétrique sans décarbonatation (texture)</b>										
Argiles (< 2 µm)	% sec	20	22	12	10	13	23	32	23	44
Limons fins (2 - 20 µm)	% sec	17	11	11	12	13	14	22	27	32
Limons grossiers (20 - 50 µm)	% sec	17	11	13	15	19	15	24	23	11
Sables fins (50 - 200 µm)	% sec	43	40	45	51	46	34	19	20	7
Sables grossiers (200 - 2000 µm)	% sec	2	15	19	11	8	13	3	5	5
<b>Texture</b>		Limon argilo-sableux	Argile sableuse	Sable argileux	Sable limoneux	Sable argilo-limoneux	Limon argilo-sableux	Argile limono-sableuse	Limon argilo-sableux	Argileux
Indice de battance		1,4	0,6	1,3	0,9	1,6	0,9	1,4	1,2	0,8
Indice de porosité		0,1	0,7	1,6	1,1	0,6	0,6	0,1	0,2	0,1
<b>Etat humique</b>										
Matières organiques	% sec	0,5	1,1	0,7	1,9	0,8	0,8	0,5	1,8	1,0
Azote total	% sec	0,043	0,061	0,036	0,093	0,061	0,072	0,025	0,094	0,072
C/N		7,2	11	12	12	7,3	6,2	11	11	8
<b>Statut acido-basique</b>										
pH eau		7,4	7,6	7,5	7,5	7,2	7,9	7,0	8,4	8,2
Calcaire total	% sec	0,4	< 0.100	< 0.100	0,6	< 0.100	< 0.100	< 0.100	3,3	0,9
CaO	mg/kg	2899	3277	2412	3631	2132	4004	3674	9361	7191
CEC Metson	meq/100g	10	12	9	8	8	13	14	14	16
<b>Milieu nutritif et environnemental</b>										
Phosphore Joret Hébert P2O5	mg/kg MS	329	335	244	201	191	167	81	241	70
Potassium K2O	mg/kg MS	95	245	207	274	297	422	153	463	257
Magnésium MgO	mg/kg MS	218	169	88	50	45	88	460	148	441
K2O/MgO		0,4	1,4	2,4	5,5	6,6	4,8	0,3	3,1	0,6
<b>Autres résultats</b>										
Conductivité	mS/cm	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
Sodium	mg/kg MS	24	15	14	17	13	18	32	27	38
<b>Capacité hydrique</b>										
Capacité de rétention en eau pF2,5	%	26	21	19	19	21	27	30	32	37
Point de flétrissement permanent pF4,2	%	12	11	8	8	8	13	14	14	21
Réserve utile	mm eau/cm sol	1,7	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	2,0	2,3	2,0
<b>Biomasse microbienne</b>										
Biomasse microbienne	mg C microbien/kg MS	< 15.000	< 15.000	< 15.000	23,3	19,3	< 15.000	< 15.000	21	< 15.000
Biomasse microbienne	% C organique	0,26	0,14	0,12	0,21	0,43	0,01	0,36	0,2	0,09

→ Lacunes : fertilités physiques, chimiques et biologiques

Faible
Moyen
Elevé

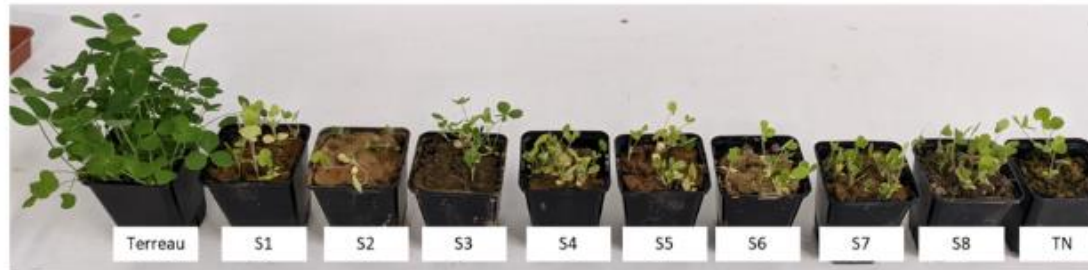




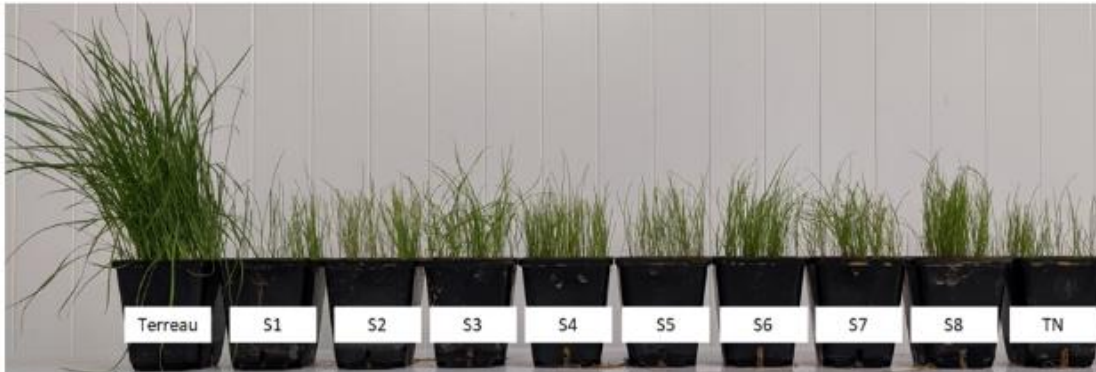
## Evaluation de la phytotoxicité

Tests de germination après 3 semaines

Trèfle



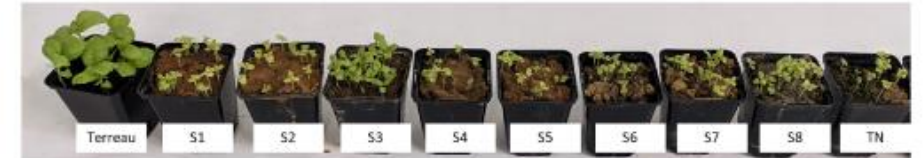
Ray grass +  
Fétuque  
rouge



Laitue



Basilic



Tomate



Menthe



- Germination mais **développement moyen**
- Qualité agro-environnementale **théoriquement compatible** avec la production de denrées alimentaires
- Nécessité d'une **ingénierie de refonctionnalisation**



## Identification d'amendements **locaux**

Matériaux terreux



Terre de découverte carrière Colas  
d'Audun-le-Tiche



Terre amendée Minett Kompost

Compost



Minett Kompost

→ **Protocole d'essais**









# Etape AgroPhyto®\_Essais

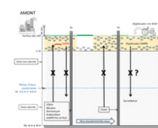


## Objectif :

Valider la faisabilité de production de denrées alimentaires saines à partir des matériaux naturels refunctionalisés du site

### Modalités de sol testées

Modalités SOLS	Mélange S1-S6 criblé à 20 mm	Terre amendée <u>Minett Kompost</u>	Terre de découverte Audun-Le-Tiche criblée à 20 mm	Compost <u>Minett Kompost</u>
				
	Proportions volumiques			
Modalité 1 (M1)	66,7%	33,3%	-	-
Modalité 2 (M2)	66,7%	-	25%	8,3%
Modalité 3 (M3)	66,7%	-	-	33,3%
Modalité 4 Témoin (M4)	-	100%	-	-
Modalité 5 Témoin (M5)	-	-	91,7%	8,3%



AterPol®  
Diagnostic



AgroPhyto\_Essais®  
Labo



AgroPhyto\_Pilote®  
In situ/on site



AgroPhyto\_Traitement®  
Parcelle



AgroPhyto\_Suivi®  
Sol, eaux, biomasses



→ Essais sous serre







5 modalités sol



4 modalités plantes



Courgettes

Tomates

Légumes fruits



Radis

Salades

Légumes racines

Légumes feuilles

→ Culture : mai – septembre 2021

→ Paramètre de suivi : qualité des denrées





Meilleurs rendements → M3 : 2/3 mélange S1-S6 criblée à 20 mm + 1/3 de compost



Comparaison des teneurs en Cd et Pb dans les denrées produites avec la réglementation  
(Règlement européen (CE) n°1881/2006\_Annexe 6)

Teneurs dans les biomasses (mg/kg brut)	Pb	Cd
Tomates	< 0,3115	< 0,01157
<b>Réglementation</b>	<b>0,1</b>	<b>0,05</b>
Courgettes	< 0,2628	< 0,00949
<b>Réglementation</b>	<b>0,1</b>	<b>0,05</b>
Salades	< 0,1551	0,017
<b>Réglementation</b>	<b>0,3</b>	<b>0,2</b>
Radis	< 0,1632	0,008
<b>Réglementation</b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>

→ Sélection de 2 scénarios d'essais pilotes



# Etape AgroPhyto®\_ Pilotes



## Objectifs :

Valider la faisabilité et les conditions techniques de la construction de sols

Valider sur site le scénario privilégié

Vérifier la qualité des denrées alimentaires produites

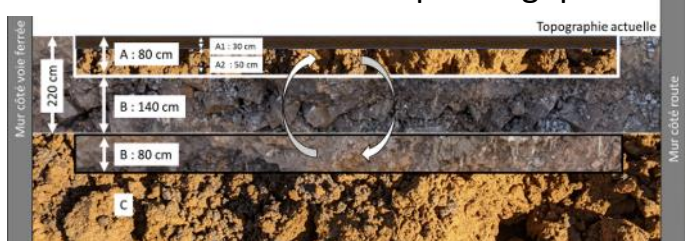
## Construction des pilotes



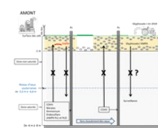
Excavation des laitiers  
sidérurgiques



P1 : Inversion de couches pédologiques



P2 : Excavation et apport de matériaux  
extérieurs issus de l'économie circulaire



ATerPol®  
Diagnostic



AgroPhyto\_Essais®  
Labo



AgroPhyto\_Pilote®  
In situ/on site



AgroPhyto\_Traitement®  
Parcelle



AgroPhyto\_Suivi®  
Sol, eaux, biomasses

Récupération des matériaux  
naturels



Inversion de couches



Apport de mélange  
terres-pierres



Apport de terre amendée







P1 : Inversion de couches pédologiques



P2 : Excavation et apport de matériaux extérieurs issus de l'économie circulaire



Apport de compost



Travail du sol



Plantations



→ Découverte d'une contamination sur P1 (Zn, Pb, Cd)

→ Création d'un pilote P1 bis en septembre 2022



Etape AgroPhyto®\_Pilotes



## Résultats biomasses

### Analyse des denrées alimentaires

P1 / P1 bis : Inversion de couches  
pédologiques



Comparaison avec des légumes  
témoins du commerce

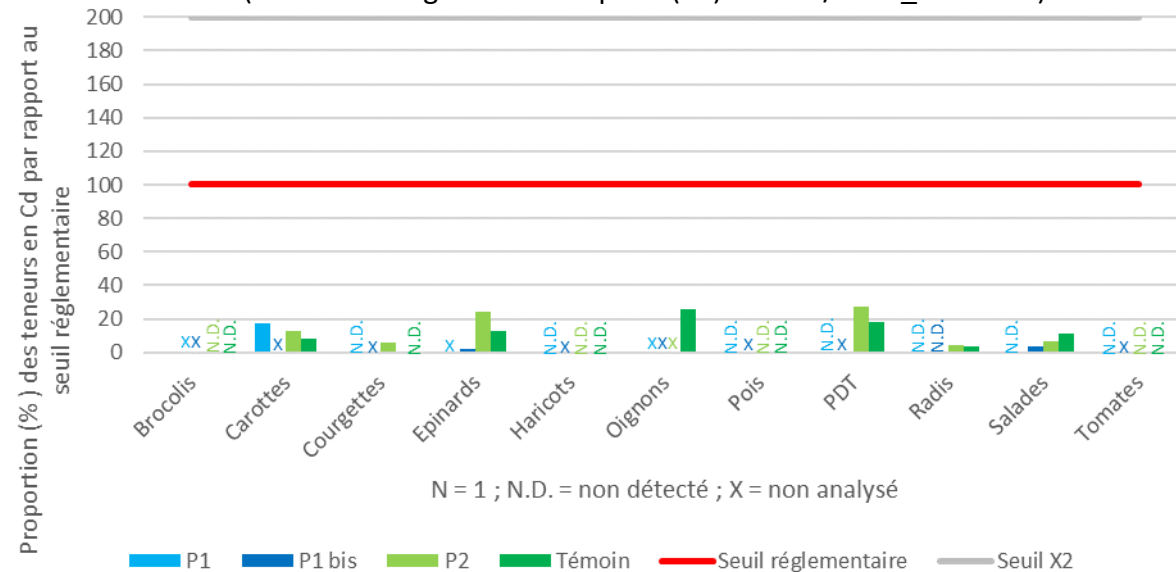


P2 : Excavation et apport de matériaux  
extérieurs issus de l'économie circulaire

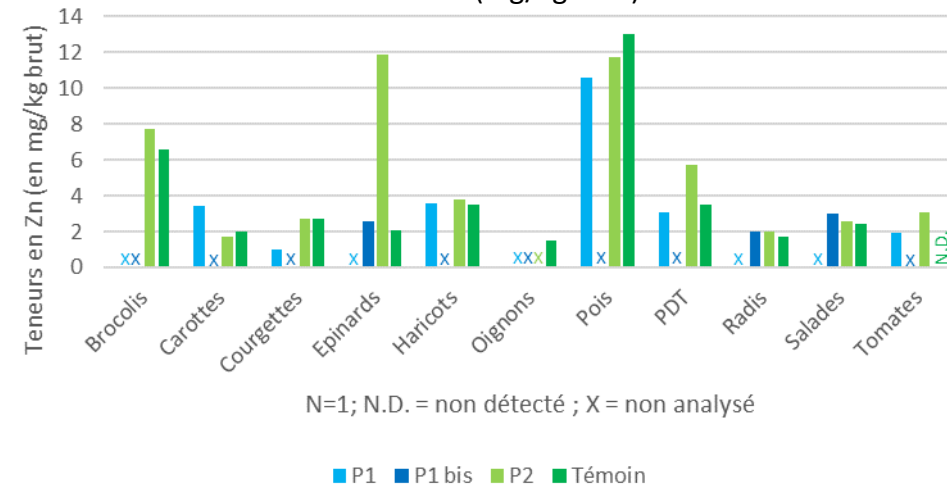


→ Respect de la réglementation  
→ Qualité similaire aux témoins

### Comparaison des teneurs en **Cd** avec la réglementation (% du seuil Règlement européen (CE) n°1881/2006\_Annexe 6)



### Comparaison des teneurs en **Zn** (mg/kg brut)



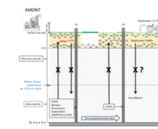




# Etape AgroPhyto®\_Pilotes

## Perspectives

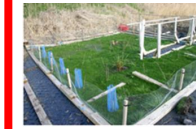
Nouvelle campagne en 2023



ATerPol®  
Diagnostic



AgroPhyto\_Essais®  
Labo



2022  
AgroPhyto\_Pilote®  
In situ/on site



AgroPhyto\_Traitement®  
Parcelle



AgroPhyto\_Suivi®  
Sol, eaux, biomasses

P1



P1 bis



P2



→ Pour confirmer les résultats observés

# Merci pour votre attention

---

[www.microhumus.fr](http://www.microhumus.fr)

[info@microhumus.fr](mailto:info@microhumus.fr)