

Réhabilitation par stabilisation et phytomanagement d'un site pollué en zinc

Essais de traitement et mise en œuvre sur site

Emmanuel VERNUS (PROVADEMSE) – Gaylord MACHINET (Microhumus)



➤ Site à réhabiliter

- ▷ Requalification foncière du site
- ▷ Activités historiques de traitement de surface, galvanisation
- ▷ Maîtrise d'Ouvrage : EPORA
- ▷ Maître d'Oeuvre : TESORA
- ▷ Groupement :
 - FORÉZIENNE – Mandataire ;
 - GAUTHEY – Co traitant ;
 - PROVADEMSE : Sous-traitants ;
 - MICROHUMUS : Sous-traitants ;

➤ Zone du site à réhabiliter :

- ▷ Problématique de fortes teneurs en zinc mobilisable (pH acide)

➤ Objectifs :

- ▷ Stabilisation du zinc et conversion en une zone végétalisée (alternative au confinement sur site initialement préconisé)



Stabilisation : Objectifs - Démarche méthodologique

- Objectifs : produire un matériau granulaire compatible avec une végétalisation (Zn lixiviable initial : 30 mg/kg)

Paramètres	Objectifs de dépollution (mg/kg MS)
Zinc sur brut	10 000
Zinc sur éluât	10

- Démarche méthodologique ESTRAPOL

- ▷ Identification de mécanismes de stabilisation appropriés
- ▷ Identification des réactifs aptes à mettre en œuvre ces mécanismes (Zn potentiel inhibiteur de prise)

- Evaluation de la durabilité de la stabilisation

- ▷ Caractérisation de l'influence du pH sur le comportement à la lixiviation
- ▷ Suivi de la dynamique de relargage par percolation

- Compatibilité avec une végétalisation

- ▷ Suivi dynamique du relargage des eaux de percolation ayant été préalablement au contact d'un sol reconstitué



Essais de stabilisation

➤ Retour d'expérience PROVADEMSE :

- ▷ Bons résultats de stabilisation du zinc par substitution cationique, sorption dans la structure des CSH et éventuelle précipitation ZnO avec
 - Ciment sulfo-alumineux
 - Ciment sulfo-alumineux additionné de CEM I

➤ Essais préliminaires en micro-éprouvettes en pâte pure avec l'éluat du sol :

- ▷ Effet de la composition de l'eau sur la prise

Pas d'influence significative sur la résistance à la compression à 24h et à 7j de la présence de zinc lixiviable dans l'eau de gâchage de 6 formulations (CEM I, ciment sulfo-alumineux, laitiers de hauts fourneaux)

- ▷ Influence de la formulation sur le relargage de zinc

Les éprouvettes des formulations ayant développé des résistances mécaniques les plus importantes (7j) présentent un relargage en zinc très faible :

- 0,3 mg/kg MS (CEM I + LHF)
- <0,2 mg/kg MS (CEM I + activateur)





Essais de stabilisation

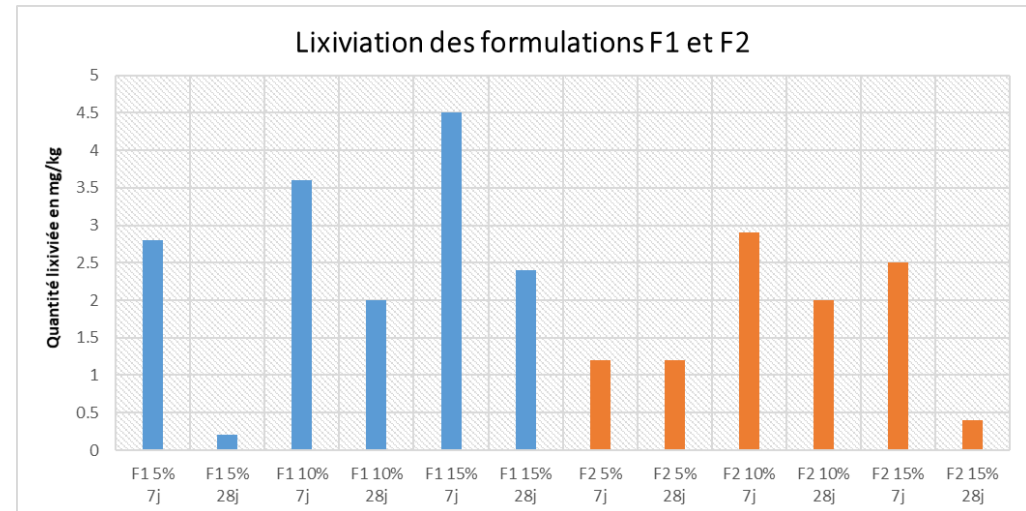
➤ Formulations de stabilisation :

▷ Sol – CEM I (F1)

- 5% de liant
- 10% de liant
- 15% de liant

▷ Sol – CEM I – LHF – Activateur (F2)

- 5% de liant
- 10% de liant
- 15% de liant



➤ Cure :

- ▷ 7 jours
- ▷ 28 jours

➤ Essai de lixiviation NF EN 12457-2

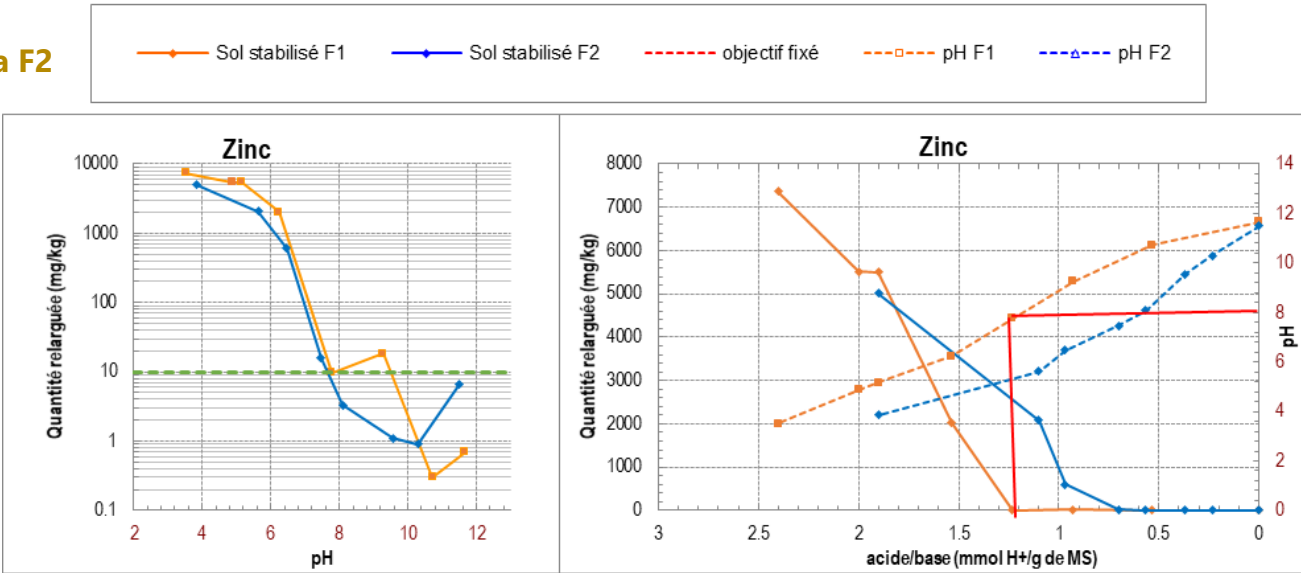
Paramètres	F1						F2					
Dosage liant (%)	5		10		15		5		10		15	
Temps (j)	7	28	7	28	7	28	7	28	7	28	7	28
pH	12,3	12,2	12,6	12,4	12,6	12,5	12,1	11,9	12,4	12,3	12,5	12,4
Zinc mg.kg ⁻¹	2,8	<0,2	3,6	2,0	4,5	2,4	1,2	1,2	2,9	2,0	2,5	0,4
Taux d'abattement (%)	91	100	88	93	85	92	96	96	90	93	92	99

Evaluation de la stabilité

EVALUATION DE LA DURABILITE DE LA STABILISATION

Disponibilité des éléments en fonction du pH

- A pH naturel (11,5):
Lixiviation du Zn dix fois supérieure pour la F2
- A pH <8 : Augmentation de la quantité lixivié du Zn dans les deux formulations F1 et F2
- Q acide (HNO3 1M) nécessaire pour atteindre pH 8:
1,2 mmol H+/g MS pour F1
0,57 mmol H+/g MS pour F2
- F1 moins sensible à:
 - Agressions acides extrêmes
→ baisse du pH 6 → 1,5 mmol H+/g MS)
 - Vieillessement naturel à long terme
→ baisse max pH 8 → uniquement en conditions d'exposition favorisant la carbonatation totales du matériau

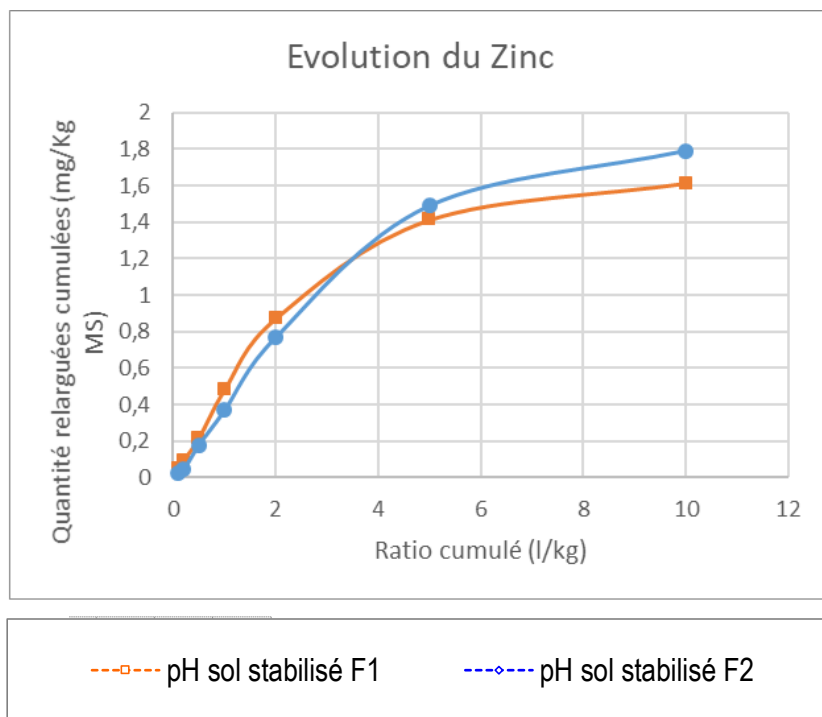


➡ Sélection de la formulation F1

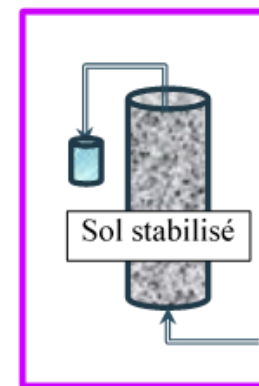
Evaluation de la stabilité

➤ EVALUATION DE LA DURABILITE DE LA STABILISATION

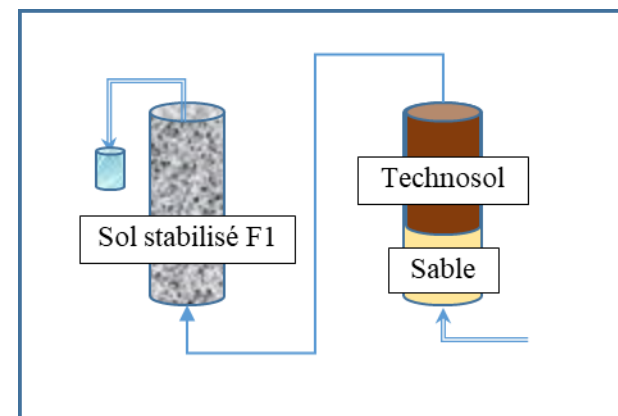
▷ Caractérisation de la dynamique de relargage par percolation



1



2





Conclusion sur la stabilisation

➤ Essais de stabilisation :

- ▷ Une addition de ciment CEM I (5% en masse) permet d'abattre la fraction lixiviable en zinc de 30 mg/kg à < 0,2 mg/kg à 28 jours tout en maintenant une structure granulaire
- ▷ Le sol stabilisé présente un pouvoir tampon élevé, permettant de maintenir un contexte chimique favorable à l'immobilisation du zinc
- ▷ La configuration de remise en place du sol stabilisé sous un couvert végétal limite l'effet de neutralisation par carbonatation
- ▷ L'infiltration des eaux au travers d'un technosol avant d'entrer en contact avec le sol stabilisé n'entraîne pas de déstabilisation du zinc.

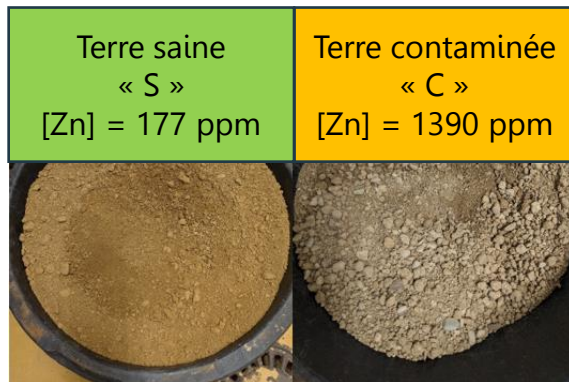


Essais de phytomanagement

➤ Essais de refonctionnalisation et de végétalisation

▷ Méthodologie :

- Caractérisation agronomique et environnementale de 2 matériaux terreux « S » et « C » ([Zn] < 10000 mg/kg MS)
- Tests de phytotoxicité
- Ingénierie de formulation et essais de croissance en pots sur 3 mois



Process AgroPhyto®





Essais de phytomanagement

➤ Caractérisation environnementale

	Terre saine « S »	Terre contaminée « C »	Seuil NF U44-551 (TV)	Seuil ISDI
[Zn] tot. (mg/kg MS)	177	1390	300	-
[Zn] sur éluât (mg/kg MS)	0,23 (0,13% du tot.)	<0,20	-	4
pH eau	7,5	8,2	-	-

➤ Caractérisation agronomique

▷ **Nécessité d'améliorer les fertilités physiques (texture, capacité hydrique), chimiques (NPK) et biologiques (activité microbienne) des remblais**

- Identification, sélection et caractérisation d'amendements organiques et d'engrais organiques

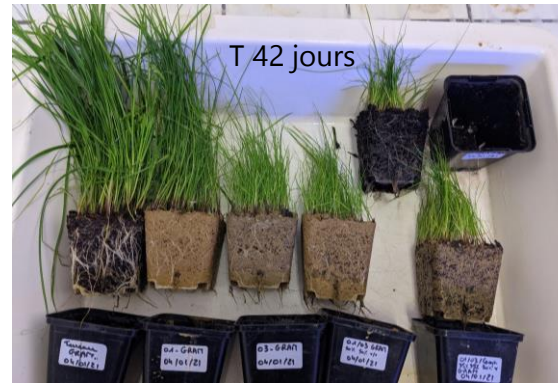


Essais de phytomanagement

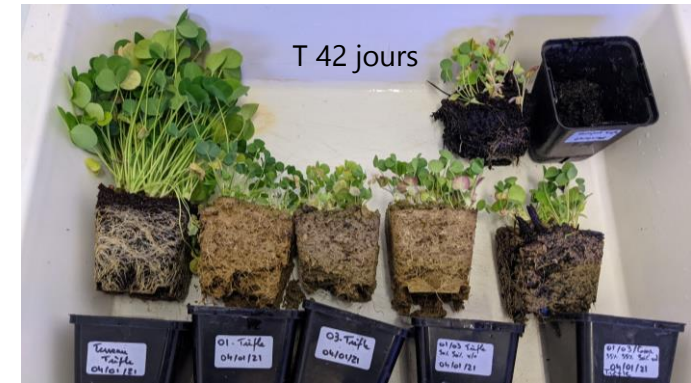
➤ Tests de phytotoxicité sur matériaux bruts ou en mélange



Plantes calaminaires



Mélange poacées



Mélange fabacées

- Terre saine « S » : non phytotoxique mais limitant le développement après germination
- Terre contaminée « C » : phytotoxique à la germination et au début de développement
- « S » + « C » : phytotoxique
- « S » + « C » + amendement organique : nette amélioration de la germination + développement



Essais de phytomanagement

➤ Ingénierie de formulation et essais de culture en pots (3 mois)

▷ Modalités SOL

- En couche
- En mélange

▷ Modalités Plantes

- M1 : mélange de poacées
- M2 : mélange de plantes calaminaires adaptées au sol riches en ETM



➤ Suivi sur 3 mois :

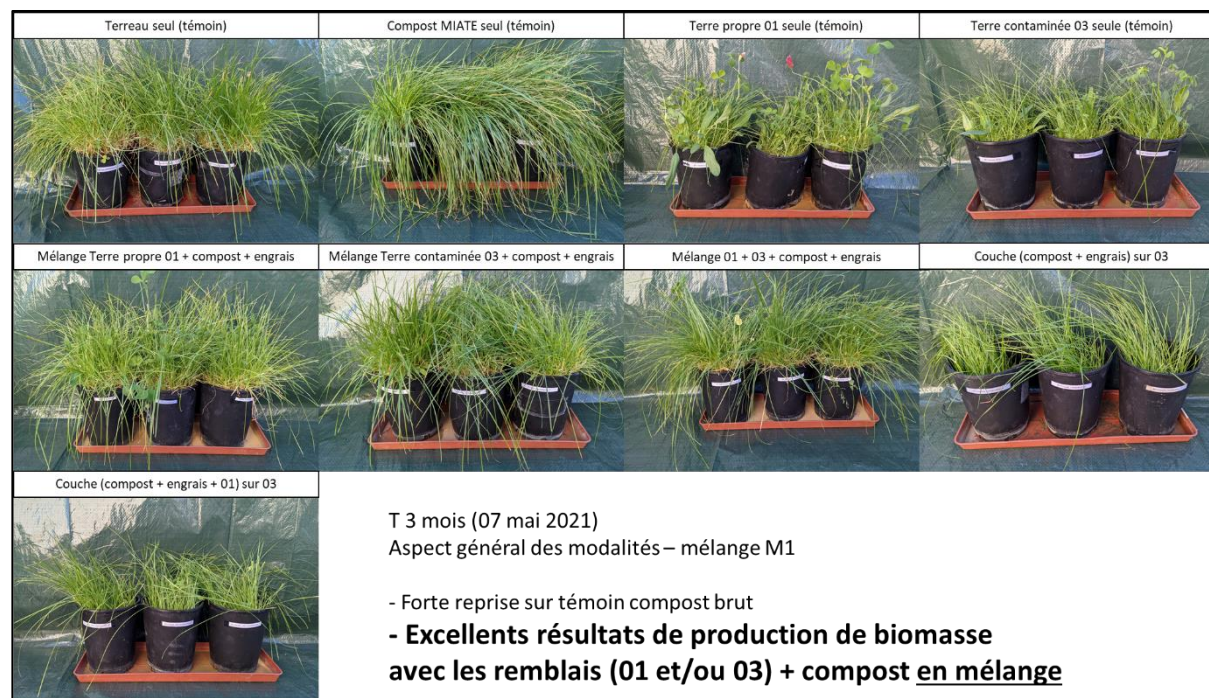
- Production de biomasse aérienne
- Aspect du feuillage
- Qualité sanitaire des feuilles
- Enracinement (stabilisation mécanique des terres)



Essais de phytomanagement

➤ Ingénierie de formulation et essais de culture en pots (3 mois)

Plantes M1 + M2	Production de biomasse (visuel)	Aspect feuillage
Témoin P-Prov 01 seul	+	
Témoin P-MicroDeb 03 seul	+	
Témoin-Terreau	+++	
Témoin-Compost NF U44-095 seul	++	
Mélange (P-Prov 01 + compost)	+++	
Mélange (P-MicroDeb 03 + compost)	+++	
Mélange (P-Prov 01 + P-MicroDeb 03 + compost)	+++	
Couche Compost sur P-MicroDeb 03	+	
Couche_mélange (Compost+P-Prov 01) sur P-MicroDeb 03	++	





Essais de phytomanagement

➤ Ingénierie de formulation et essais de culture en pots (3 mois)

GAUTHEY		M1 Terreau (témoin)	M1_P-MicroDeb 03+compost+engrais	NFU 44-051 Matières végétales ^e
Cadmium	mg/kg MS	< 0,11	< 0,11	3
Plomb	mg/kg MS	< 3	< 3,1	180
Mercure	mg/kg MS	< 0,09	< 0,095	2
Chrome	mg/kg MS	1	1	120
Cuivre	mg/kg MS	6	16	300
Nickel	mg/kg MS	< 0,56	1	60
Zinc	mg/kg MS	42	293	600

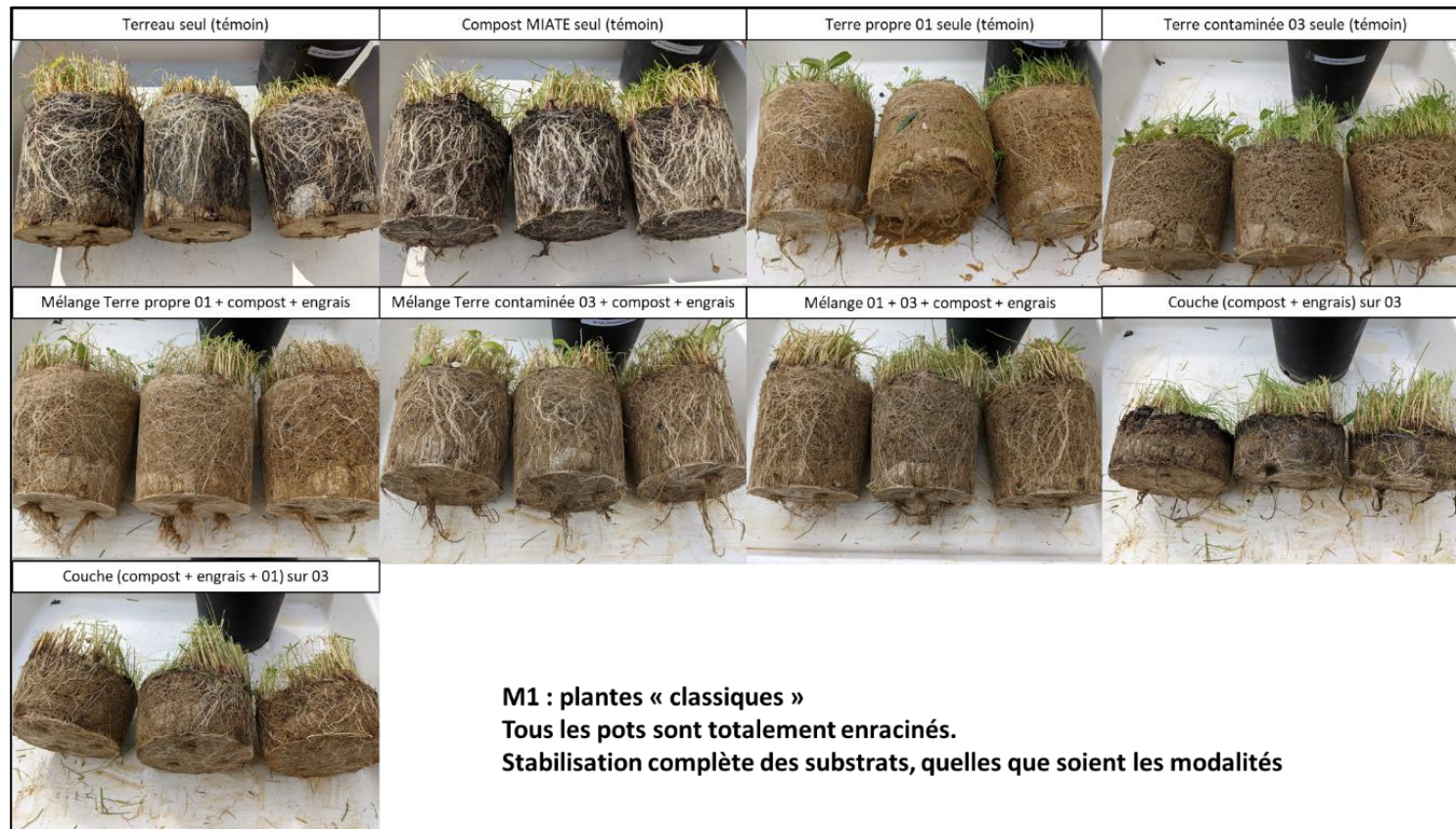
Les teneurs en zinc des feuilles sont compatibles avec la norme Amendements organiques NF U44-051, dénomination 6 « matières végétales ».

Les feuilles peuvent être valorisées en compostage, ou en mulch.



Essais de phytomanagement

➤ Ingénierie de formulation et essais de culture en pots (3 mois)





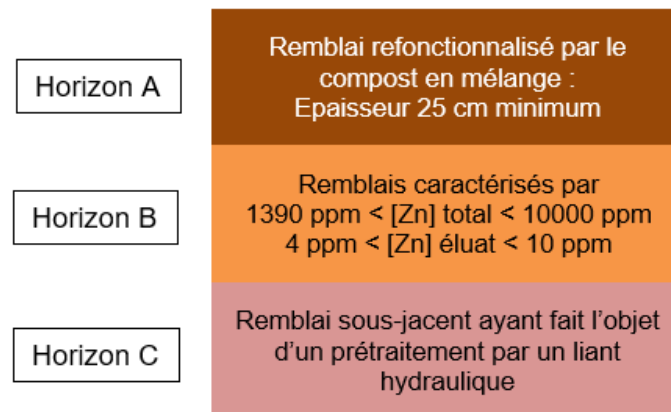
Essais de phytomanagement

➤ Conclusions des essais de refunctionalisation et de végétalisation

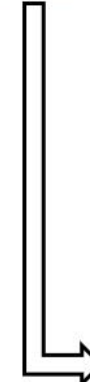
▷ Ingénierie de formulation

- Sur la base des caractéristiques agro-environnementales des matériaux « S » et « C »,
refunctionalisation efficace de « C » par apport de compost et d'engrais organique
 - ▷ Production de feuilles saines en quantité
 - ▷ Production de racines stabilisant mécaniquement les sols
 - ▷ Végétalisation par des plantes classiques ou des plantes calaminaires

▷ Protocole pour la phase terrain



Retournements successifs au chargeur
jusqu'à obtention d'un mélange HOMOGENE



Remblais et compost homogénéisés



Mise en œuvre des traitements sur site

- 1^{ère} phase : Terrassement, mise en stock et caractérisation des terres issues des zones impactées





Mise en œuvre des traitements sur site

➤ 2^{ème} phase : Stabilisation des terres impactées en Zinc

- ▷ Terres supérieures aux seuils de dépollution à stabiliser mises en place sur la zone dédiée ;
- ▷ Arrosage des terres pour obtenir le taux d'humidité adéquat ;
- ▷ Épandage du ciment CEM I selon le dosage calculé sur la base des résultats de Provademse
- ▷ Malaxage des terres avec le ciment CEM I ;
- ▷ Volume de matériaux stabilisés : 1630 m³

EIFFAGE
FORÉZIENNE

EIFFAGE
GAUTHEY





Mise en œuvre des traitements sur site

➤ 3^{ème} phase : Recouvrement, amendement, ensemencement

- ▷ Recouvrement des terres stabilisées avec les matériaux inférieurs aux seuils de dépollution ;
- ▷ Amendement des matériaux selon les résultats des essais de Microhumus avec du compost et de l'engrais organique ;
- ▷ Ensemencement des matériaux selon le mélange de graines défini par les études de Microhumus.
- ▷ Volume des matériaux refonctionnalisés et végétalisés : 1100 m³





Mise en œuvre des traitements sur site

➤ 4ème phase : Suivi agronomique – en cours

- ▷ Visite 1 fois/mois pour contrôler la pousse des végétaux sur une année après la fin des travaux;
- ▷ Analyses Biomasse sur ETM ;

