Le génie pédologique : un scénario à envisager dans les plans de gestion

Pollutec 2025 – Guillaume Hostyn Chef de projets au sein du Pôle Génie Ecologique GINGER BURGEAP

09/10/2025



_Contexte : informations clés

Détails du site

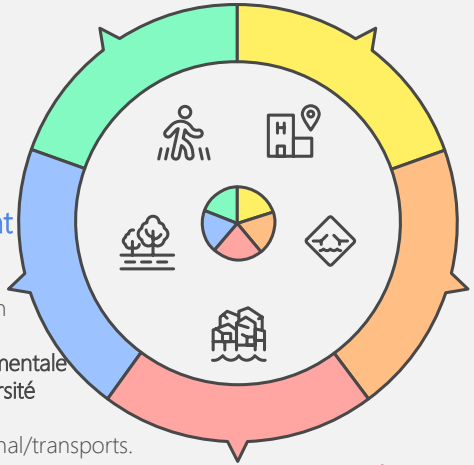
Parcelle urbaine 1300 m²

Stockage de matériel

Sans indice de pollution de surface

Utilisateurs cibles

Ouvriers
Personnel d'entretien
Public



Intention d'aménagement

Renaturation
Aire de détente
Cheminement piéton

Végétalisation ornementale
Reconquête **biodiversité**

Lien urbain entre canal/transports.

Historique sensible

Stockage de carburant

Structures enterrées ?

Incertitude résiduelle

Contexte urbain contraint

Densément bâti

Proximité d'un canal et d'infrastructures de transport







_Contexte : informations clés

IMPACTS CONNUS

- Contamination hétérogène en métaux et metalloïdes lourds dans les sols de surface
- Présence d'une Zone de Pollution Concentrée en hydrocarbures au centre du site
- Traces de COV dans les gaz du sol
- Traces de métaux et COV dans les eaux souterraines

Détails du site

Intenti
d'amé
Renaturation
Aire de détente
Cheminement piéton

Végétalisation ornementale
Reconquête biodiversité

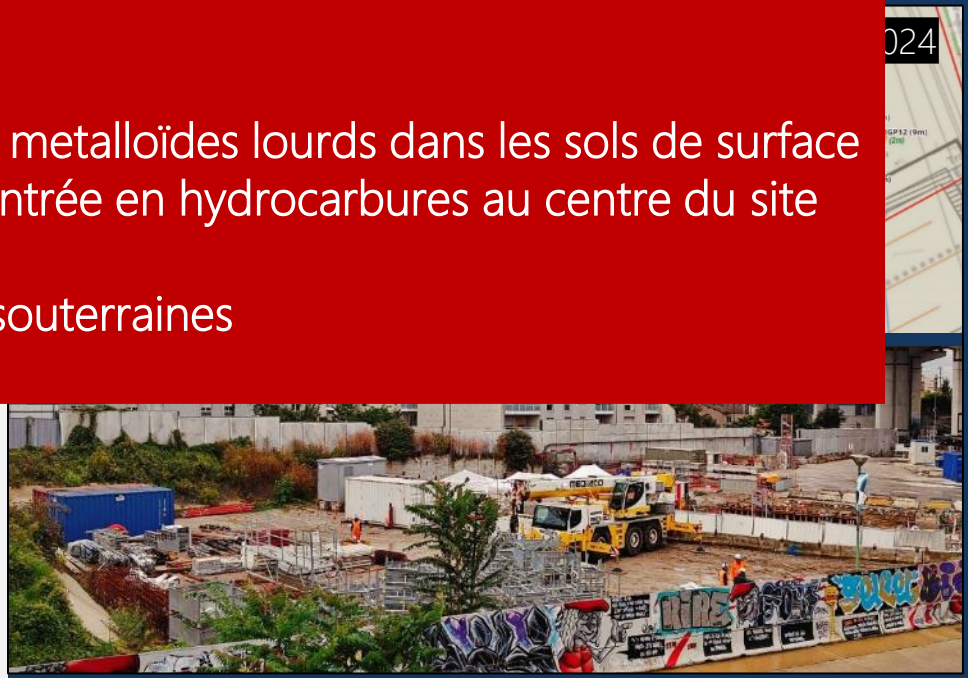
Lien urbain entre canal/transports.

Structures enterrées ?

Incertitude résiduelle

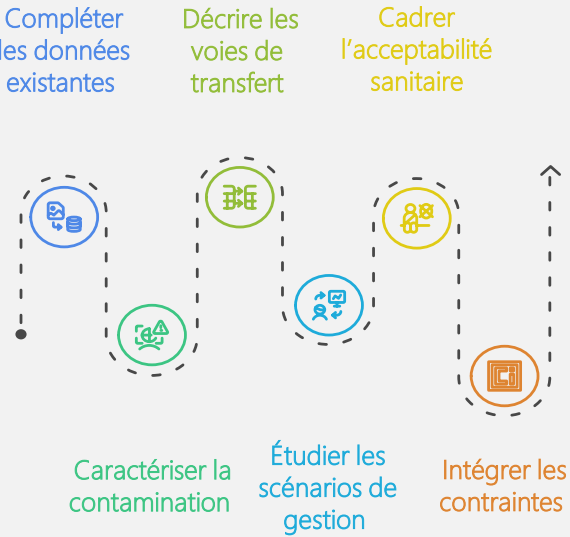
Contexte urbain contraint
Densément bâti

Proximité d'un canal et d'infrastructures de transport

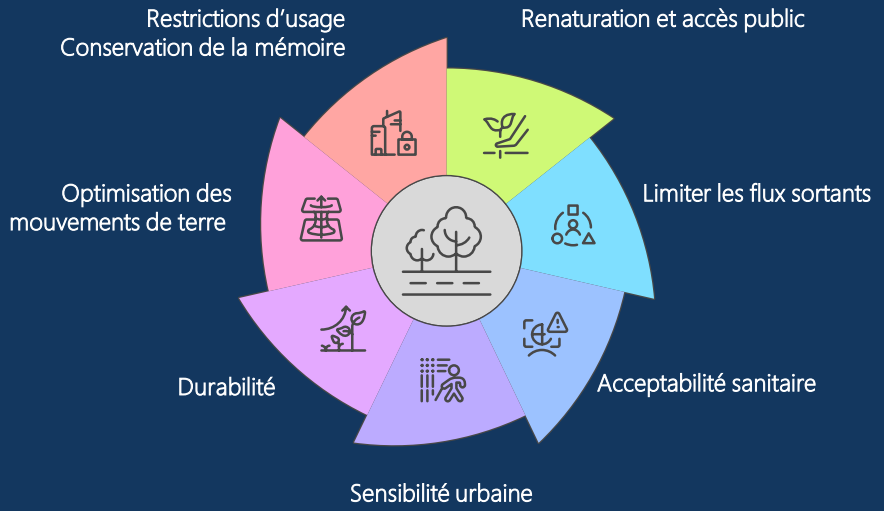


_Enjeux

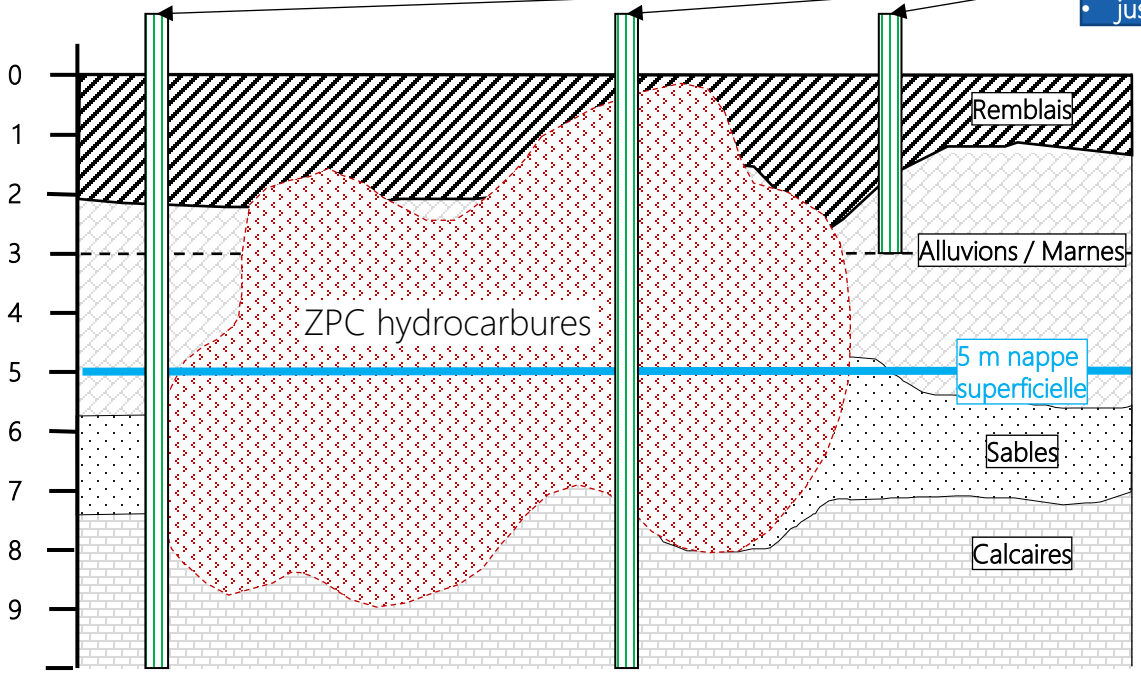
Séquence de la mission



Aperçu des objectifs du projet



_Investigations



16 sondages carottés
- 0-3 m dans remblais sur l'ensemble de l'emprise
- jusqu'à 9 m pour délimiter ZPC latéralement et en profondeur

SSP
- TPH, HAP, PCB, BTEX, COHV
- As, Ba, Cd, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Sb, Se, Zn
- Pack ISDI

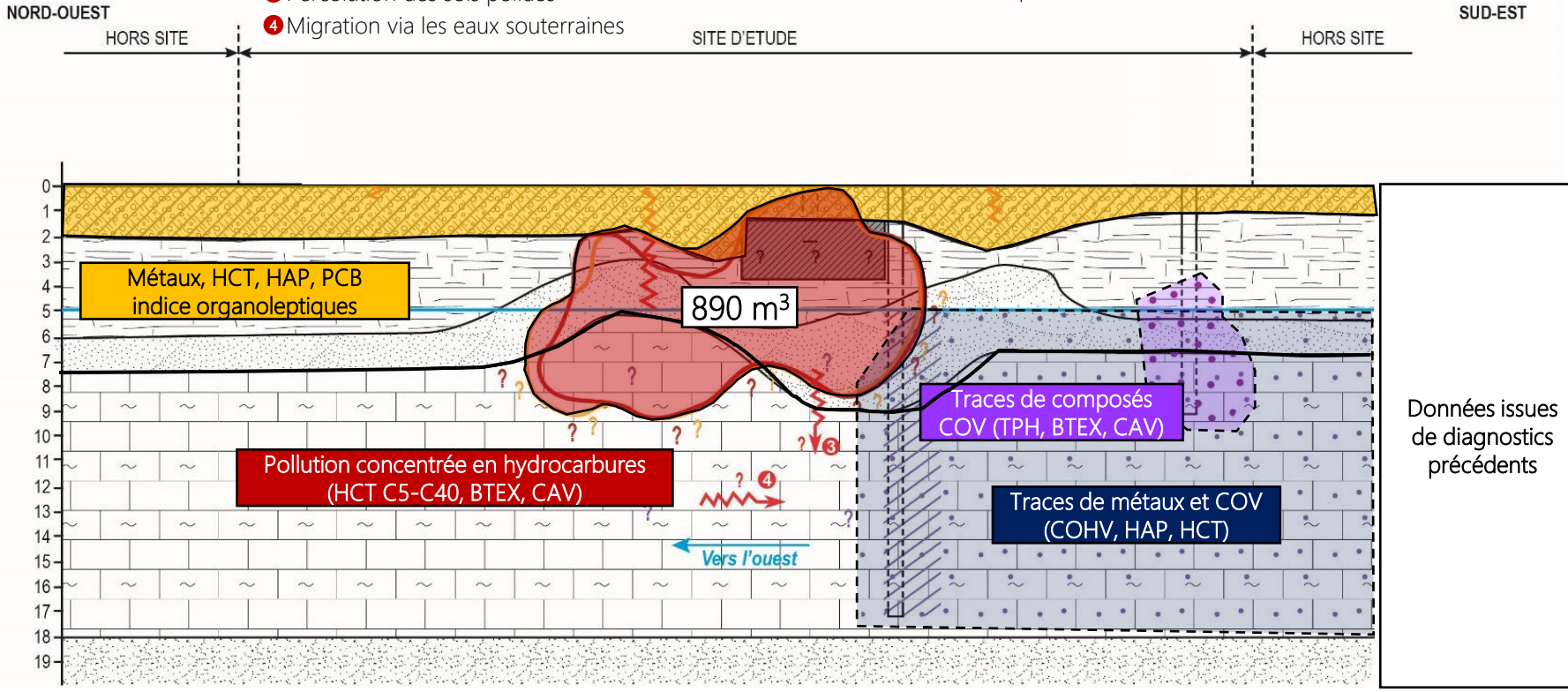
Agropédologie
- Granulométrie, masse volumique, rétention en eau
- pH, CEC conductivité, P assimilable, K, Mg, Ca, Na échangeables
- Matière organique, Azote

⚠ Pas de caractérisation des eaux souterraines et des gaz du sol à ce stade

Diagnostic SSP - Schéma conceptuel

1. Volatilisation de composés volatils
2. Envol de sol / poussières contenant polluants
3. Percolation des sols pollués
4. Migration via les eaux souterraines

A. Inhalation de composés volatils
B. Inhalation / ingestion de composés volatils / contact direct de composés volatils



_Problématiques identifiées

Etat du milieu souterrain	Risques associés
Teneurs en **métaux supérieures** aux valeurs du **HCSP** répartis de manière **hétérogène** sur site (surface)	Inhalation / ingestion de sols / poussières renfermant des polluants + contact direct
Impacts ponctuels en **COV** et **métaux** jusqu'à **2 voire 3 m**	Milieu dégradé
Zone de **pollution en HC** de la **surface** jusqu'à au moins **9 m** de profondeur	Milieu dégradé

_Problématiques identifiées

Etat du milieu souterrain	Risques associés
Teneurs en **métaux supérieures** répartis de manière **hétérogè**	e sols / poussières renfermant des ts + contact direct
Impacts ponctuels en **COV** et **métaux** jusqu'à **2 voire 3 m**	Milieu dégradé
Zone de **pollution en HC** de la **surface** jusqu'à au moins **9 m** de profondeur	Milieu dégradé

QUELLES MESURES DE GESTION A DISPOSITION ?

_Mesures de gestion envisagées

Action sur les sols de surface

Scénario 0 (commun à tous les scénarios)

Pollution

Purges des **impacts notables** de **surface** (composés **organiques** et certains **métaux**) facilement accessibles par **extraction à la pelle**

Recouvrement

Par terres saines sur zones à usages sensibles et double couche organique et minérale sur ZPC

Action sur les pollutions en hydrocarbures

Scénario 1

Pollution => traitement hors site

- **Pré-venting :** sécuriser la fouille
- **Excavation 0-2 m** par **talutage**
- **Excavation 2-9 m** par **substitution**
- **Remblaiement** sain en surface et **recouvrement**

Scénario 2

Pollution => traitement *in situ*

- **Décapage ~0–1 m** sur la ZPC
- **Bioventing 1-4/5 m** de la **ZNS :** injection/extraction d'air, optimisation O_2/humidité
- **Biosparging (> 4/5-9 m)** de la **ZS** : insufflation sous nappe
- **Recouvrement**

Action sur la pollution

Action sur les voies de transfert

Méthodologie nationale des sites et sols pollués d'avril 2017 stipule :
« *la priorité consiste d'abord à déterminer les modalités de suppression des pollutions concentrées plutôt que d'engager des études pour justifier leur maintien en l'état* »
Pour supprimer un risque, il est possible d'agir : sur la source et/ou la voie de transfert.

_Mesures de gestion envisagées

Action sur les sols de surface

Scénario 0 (commun à tous les scénarios)

Pollution

Purges des **impacts notables** de **surface** (composés **organiques** et certains **métaux**) facilement accessibles par **extraction à la pelle**

Recouvrement

Par terres saines sur zones à usages sensibles et double couche organique et minérale sur ZPC

QU'EN EST-IL DE LA QUALITE AGRONOMIQUE DES SOLS DU SITE ?

Action sur les pollutions en hydrocarbures

Scénario 2

Polluti

- **Pré-venting :** sécuriser la fouille
- **Excavation 0-2 m** par **talutage**
- **Excavation 2-9 m** par **substitution**
- **Remblaiement** sain en surface et **recouvrement**

…ution => traitement *in situ*

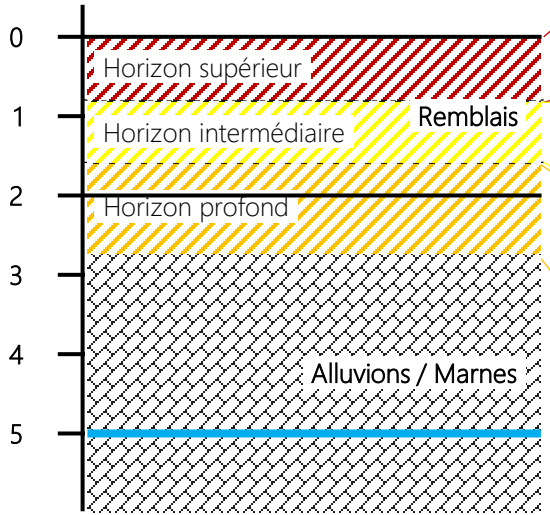
- **Décapage ~0–1 m** sur la ZPC
- **Bioventing 1-4/5 m** de la **ZNS :** injection/extraction d'air, optimisation O_2/humidité
- **Biosparging (> 4/5-9 m)** de la **ZS** : insufflation sous nappe
- **Recouvrement**

Action sur la pollution

Action sur les voies de transfert

Méthodologie nationale des sites et sols pollués d'avril 2017 stipule :
« *la priorité consiste d'abord à déterminer les modalités de suppression des pollutions concentrées plutôt que d'engager des études pour justifier leur maintien en l'état* »
Pour supprimer un risque, il est possible d'agir : sur la source et/ou la voie de transfert.

_Diagnostic agropédologique



Médiocre

Remblais anthropiques graveleux

- sols calcaires et très alcalins (pH > 10)
- pauvres en MO et CEC faible
- salinité fréquemment élevée

→ Aptitude à refertilisation compromise

Moyen

Limons sableux

- sols peu calcaires et alcalins (pH ≈ 8,5)
- pauvres en MO et CEC faible
- pas de salinité

→ Aptitude à refertilisation OK

Faible

Alluvions calcaires

- sols très calcaires et très alcalins (pH > 11)
- pauvres en MO et CEC faible
- salinité fréquemment élevée
- Bonne rétention en eau (texture argileuse)

→ Aptitude à refertilisation compromise

↑

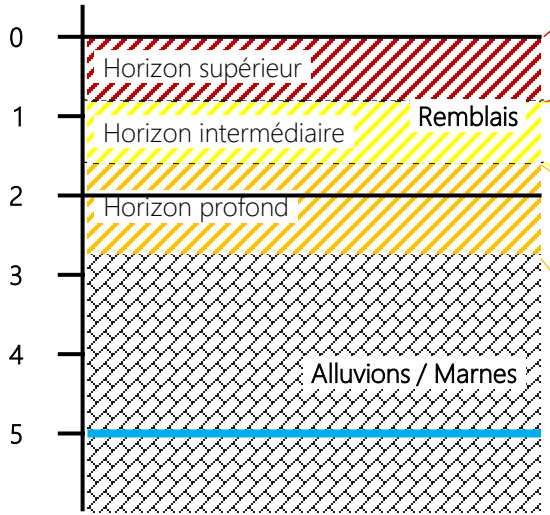
Impacts hétérogènes en métaux & Impacts ponctuels en hydrocarbures

↓

↑

Inhalation / ingestion de sols / poussières renfermant des polluants + contact direct

_Diagnostic agropédologique



Médiocre

Remblais anthropiques graveleux

- sols calcaires et très alcalins (pH > 10)
- pauvres en MO et CEC faible
- salinité fréquemment élevée

→ Aptitude à refertilisation compromise

EST-IL POSSIBLE D'AMELIORER LA SITUATION ?

- sols peu calcaires et alcalins (pH ≈ 8,5)
- pauvres en MO et CEC faible
- pas de salinité

→ Aptitude à refertilisation OK

Faible

Alluvions calcaires

- sols très calcaires et très alcalins (pH > 11)
- pauvres en MO et CEC faible
- salinité fréquemment élevée
- Bonne rétention en eau (texture argileuse)

→ Aptitude à refertilisation compromise

↑

Impacts hétérogènes en métaux & Impacts ponctuels en hydrocarbures

↓

↑

Inhalation / ingestion de sols / poussières renfermant des polluants + contact direct

_Le Génie Pédologique : de quoi parle-t-on ?

Le **génie pédologique** regroupe l'**ensemble des techniques permettant de concevoir, transformer ou restaurer un sol** afin qu'il remplisse les **fonctions attendues par un projet d'aménagement,** tout en prenant en compte ses contraintes chimiques, physiques et biologiques.

Il s'appuie sur **trois grands principes** :

- Réutilisation et amélioration des matériaux en place
- Amélioration ciblée des propriétés du sol
- Intégration dans la gestion globale du site

Le but est de passer d'un sol **inerte ou contraignant** à un **sol fonctionnel**, capable de :

- Soutenir durablement la végétation
- Limiter les poussières et l'érosion
- Réduire les besoins d'entretien

_Le Génie Pédologique : de quoi parle-t-on ?

Le **génie pédologique** regroupe l'**ensemble des techniques permettant de concevoir, transformer ou restaurer un sol** afin qu'il remplisse les **fonctions attendues par un projet d'aménagement,** tout en prenant en compte ses contraintes chimiques, physiques et biologiques.

Il s'appuie sur **trois grands p**

COMMENT PEUT-ON LE DECLINER ICI ?

- Réutilisation et amélioration des matériaux en place
- Amélioration ciblée des propriétés du sol
- Intégration dans la gestion globale du site

l inerte ou contraignant à un **sol fonctionnel**, capable de :

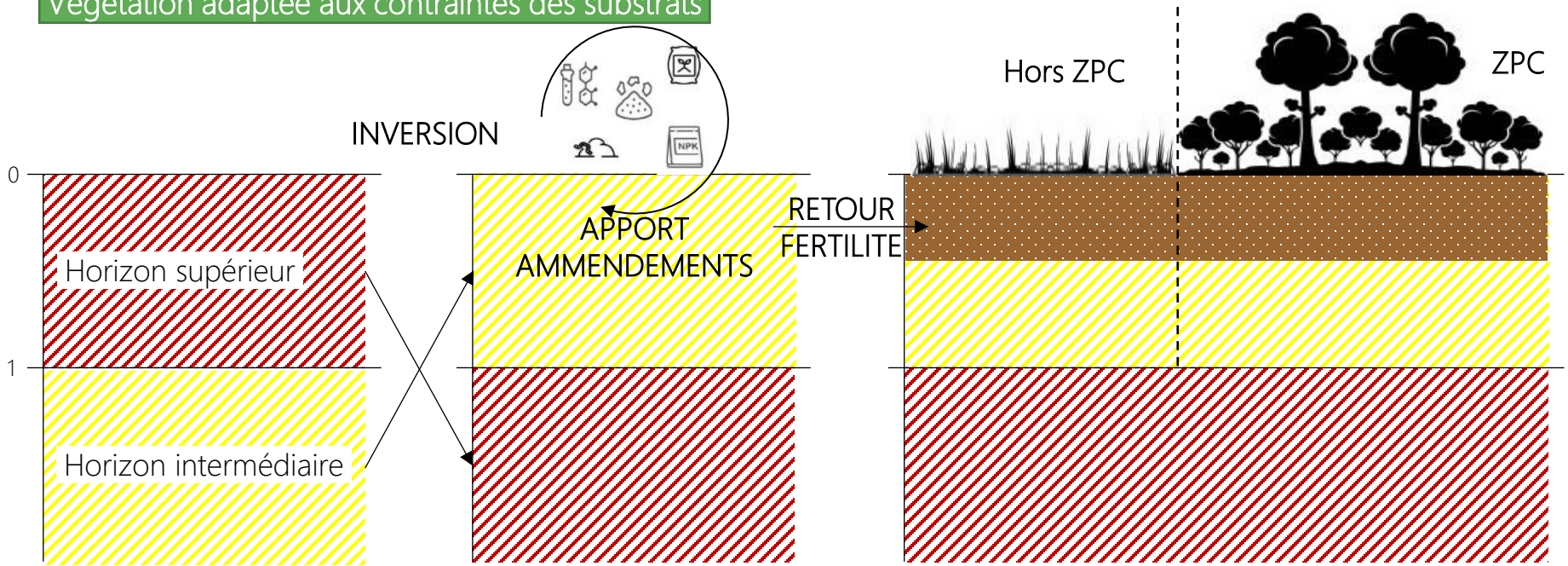
- Soutenir durablement la végétation
- Limiter les poussières et l'érosion
- Réduire les besoins d'entretien

_Stratégie de génie pédologique proposée

Matière organique
Engrais azotés et phosphatés
Souffre élémentaire localisé
Bentonite
Végétation adaptée aux contraintes des substrats

Restriction d'usage
Conservation de la mémoire

<u>Végétation dense</u>
choix d'espèces pour créer une barrière naturelle empêchant la présence humaine



_Stratégie de génie pédologique proposée

Restriction d'usage
Conservation de la mémoire

<u>Végétation dense</u>
choix d'espèces pour créer une barrière naturelle empêchant la présence humaine

Matière organique
Engrais azotés et phosphatés
Souffre élémentaire localisé
Végétation adaptée aux contraintes des substrats

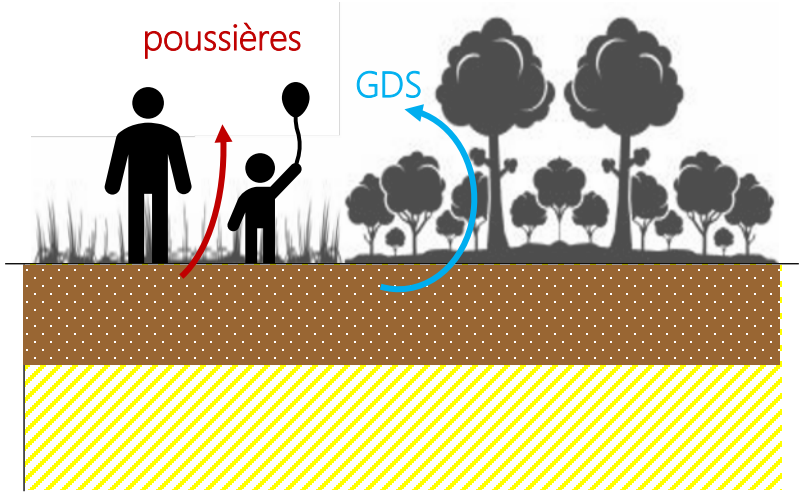
LA STRATEGIE DE GENIE PEDOLOGIQUE EST-ELLE COMPATIBLE AVEC LES USAGES SANS RECOUVREMENTS ?



_Les risques résiduels après travaux

- Ingestion de sol et de poussière : voie dominante tirée par le plomb malgré le génie pédologique
- Inhalation de vapeurs en air extérieur : voie résiduelle mais non négligeable (pilotée par des COV dont TCE et la fraction aromatique des hydrocarbures) au niveau de la ZPC

INCOMPATIBILITE DES USAGES SANS RECOUVREMENT MALGRE LE GENIE PEDOLOGIQUE

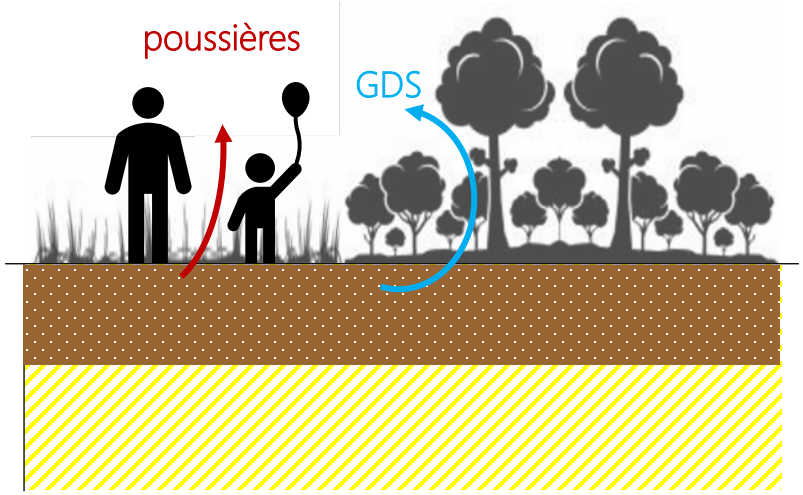


_Les risques résiduels après travaux

- Ingestion de sol et de poussière : voie dominante tirée par le plomb malgré le génie pédologique
- Inhalation de vapeurs en air extérieur : voie résiduelle mais non négligeable (pilotée par des COV dont TCE et la fraction aromatique des hydrocarbures) au niveau de la ZPC

INCOMPATIBILITE DES USAGES SANS RECOUVREMENT MALGRE LE GENIE PEDOLOGIQUE

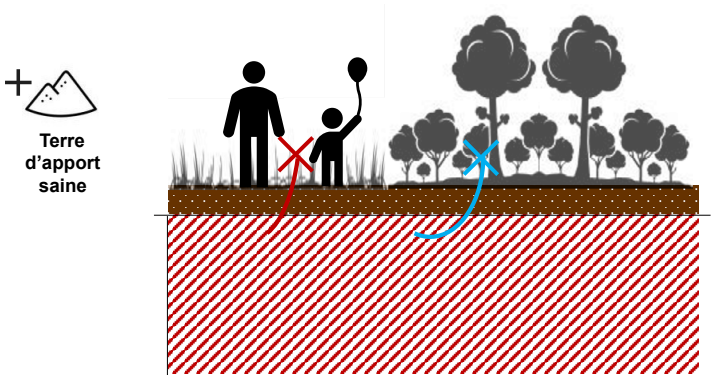
LE GENIE PEDOLOGIQUE A-T-IL ALORS UNE UTILITE ?



_Risques associés au recouvrement seul

Sols dégradés, qualité agronomique médiocre

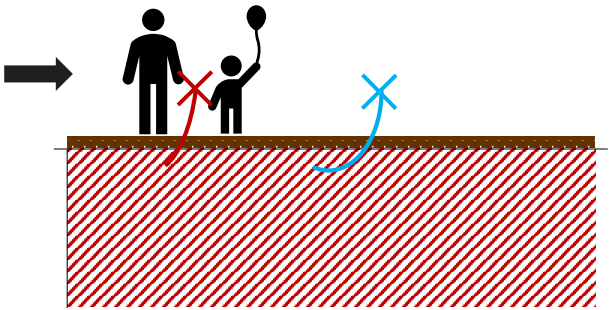
- Remblais graveleux
- Mauvaise rétention en eau
- Très forte alcalinité
- Pauvreté en MO
- Fertilité chimique dégradée, salinité



Risques du recouvrement seul sans génie pédologique :

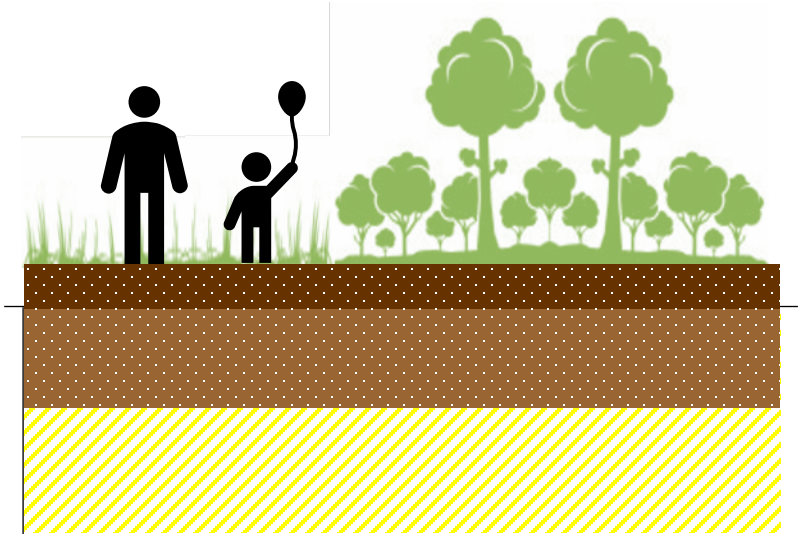
- Perte d'intégrité de la terre d'apport => retour du risque
- Discontinuité texturale => compaction rapide du sous-sol non travaillé
- Chloroses, stress hydrique, risque de mortalité à 1-3 ans
- Entretien/fertilisation chroniques nécessaire
- Risque d'alcalinisation progressive du recouvrement

Durabilité du projet d'aménagement compromise



_Intérêt du Génie Pédologique malgré le recouvrement

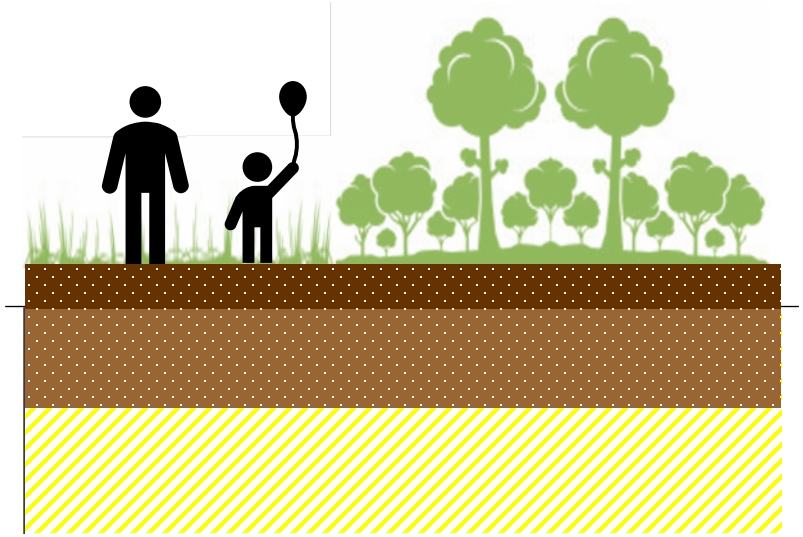
- Un sol **fonctionnel** au-delà de la terre d'apport
- **Pérennité sanitaire** avec couvert végétal dense
- Qualité **paysagère durable**
- L'opportunité du retour durable de la **biodiversité**



_Intérêt du Génie Pédologique malgré le recouvrement

- Un sol **fonctionnel** au-delà de la terre d'apport
- **Pérennité sanitaire** avec couvert végétal dense
- Qualité **paysagère durable**
- L'opportunité du retour durable de la **biodiversité**

Le **recouvrement** sécurise l'**exposition**, le **génie pédologique** sécurise la **végétation et la durabilité de l'aménagement**



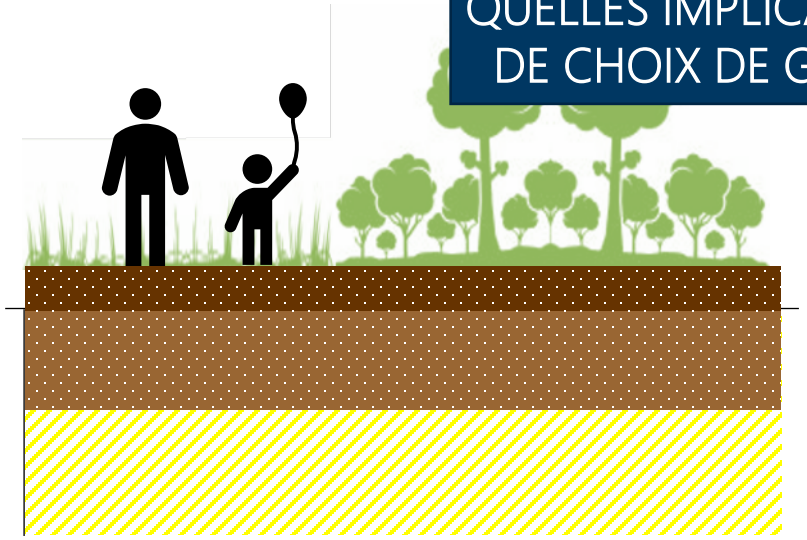


_Intérêt du Génie Pédologique malgré le recouvrement

- Un sol **fonctionnel** au-delà de la terre d'apport
- **Pérennité sanitaire** avec couvert végétal dense
- Qualité **paysagère durable**
- L'opportunité du retour durable de la **biodiversité**

Le **recouvrement** sécurise l'**exposition**, le **génie pédologique** sécurise la **végétation et la durabilité de l'aménagement**

QUELLES IMPLICATIONS EN TERMES DE CHOIX DE GESTION DU SITE ?





_Evaluation des scénarios

Scénario	Coûts décomposés (HT)	Délais indicatifs	Atouts	Inconvénients / Vigilances
0	Travaux + recouvrements ≈ 181–204 k€ (hors AEP) Total avec aléas 20 % ≈ 266–313 k€	≈ 4 mois : • conception ~2 • mise en œuvre ~1 • compléments ~1 (hors études complémentaires)	• réemploi maximal des terres • flux sortants moindres • coûts et nuisances maîtrisés • empreinte carbone positive • phasage souple	• contrôle strict des terres et substrats d'apport
1	Travaux ZPC ≈ 741–821 k€ (hors aléas). dont : • ingénierie préalable ≈ 30–50 k€ • MOE travaux ≈ 93–104 k€	≈ 8–10 mois : • conception ~2 • traitement 6–8 • compléments ~1 (hors aléas)	• efficacité immédiate sur la source • délai plus court • filière robuste et classique	• plus coûteux • carbone & déchets élevés • nuisances chantier • compatibilité des ouvrages béton à sécuriser • traçabilité filières
2	Travaux ZPC ≈ 275–346 k€ (hors aléas) dont : • ingénierie préalable ≈ 85–119 k€ • MOE travaux ≈ 43–56 k€	≈ 16–18 mois : • conception ~4 • traitement 12–16 • compléments S0 identiques (hors aléas)	Meilleur compromis global • coût modéré • flux sortants très réduits • nuisances limitées • cohérent avec le S0	• durée plus longue • performance dépendante des perméabilités • essai de dimensionnement indispensable • besoin de monitoring durant l'exploitation

_Evaluation des scénarios

Scénario	Coûts décomposés (HT)	Délais indicatifs	Atouts	Inconvénients / Vigilances
0	Travaux + recouvrements ≈ 181–204 k€ (hors AEP) Total avec aléas 20 % ≈ 266–313 k€	≈ 4 mois : • conception ~2 • mise en œuvre ~1 • compléments ~1 (hors études complémentaires)	• réemploi maximal des terres • flux sortants moindres • coûts et nuisances maîtrisés • empreinte carbone positive • phasage souple	• contrôle strict des terres et substrats d'apport
1	Travaux ZPC ≈ 741–821 k€ (hors aléas). dont : • ingénierie préalable ≈ 30–50 k€ • MOE travaux ≈ 93–104 k€	≈ 8–10 mois : • conception ~2 • traitement 6–8 • compléments ~1 (hors aléas)	• efficacité immédiate sur la source • délai plus court • filière robuste et classique	• plus coûteux • carbone & déchets élevés • nuisances chantier • compatibilité des ouvrages béton à sécuriser • traçabilité filières
2	Travaux ZPC ≈ 275–346 k€ (hors aléas) dont : • ingénierie préalable ≈ 85–119 k€ • MOE travaux ≈ 43–56 k€	≈ 16–18 mois : • conception ~4 • traitement 12–16 • compléments S0 identiques (hors aléas)	Meilleur compromis global • coût modéré • flux sortants très réduits • nuisances limitées • cohérent avec le S0	• durée plus longue • performance dépendante des perméabilités • essai de dimensionnement indispensable • besoin de monitoring durant l'exploitation

POUR QUELLE SUITE ?

Quelle suite à donner

- **Plan de Conception de Travaux :** finaliser l'acquisition de données et le dimensionnement pour sécuriser choix, coût et délais.

Diagnostic complémentaire

- **Sols** : évaluer la **bioaccessibilité orale du Plomb**
- **Sols autour de la ZPC** : préciser la délimitation latérale
- **Gaz du sol** : au droit et en périphérie de la ZPC
- **Eaux souterraines** : au droit/aval ZPC

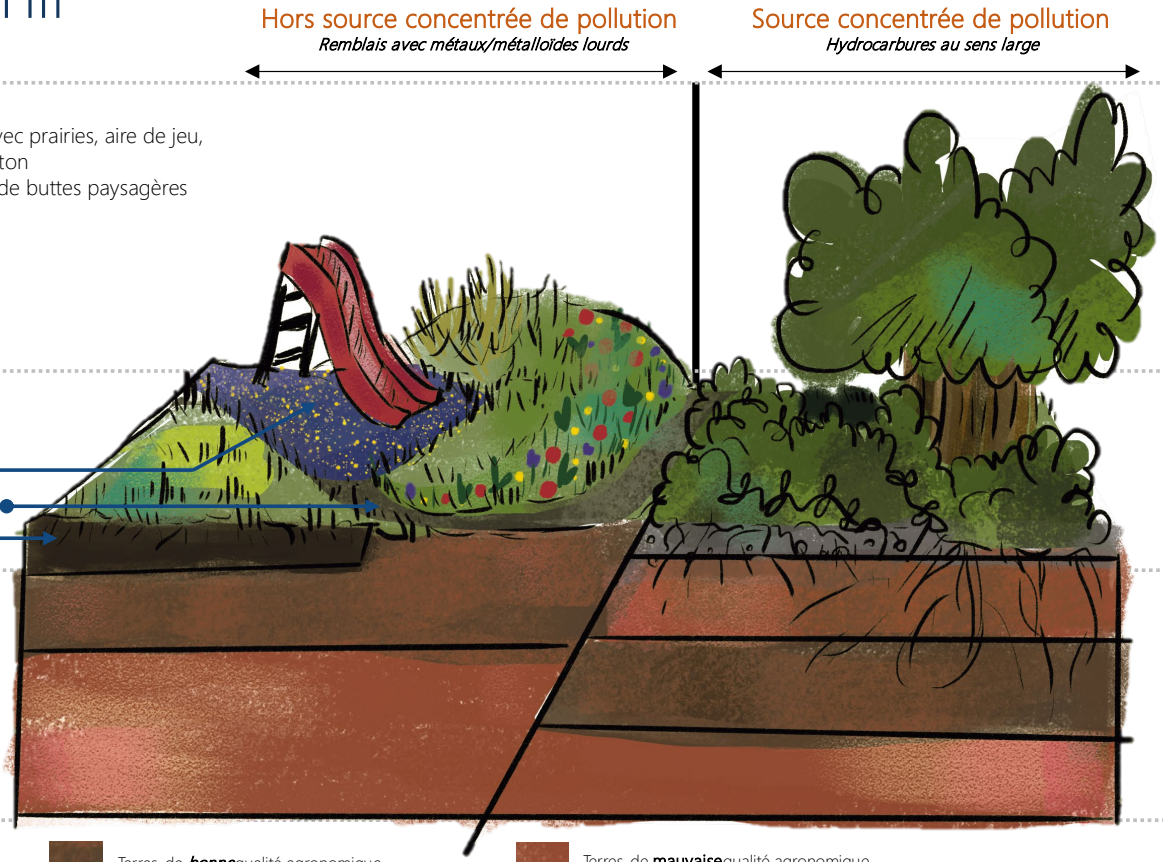
Compléments selon le scénario retenu

- **S0 – Génie Pédologique** : **essais de croissance** en laboratoire pour évaluer les formulation
- **S1 - Excavation / substitution** : études **géotechniques G2PRO** + incidence hydrogéologique
- **S2 - Bioventing / biosparging** : **essais de faisabilité et dimensionnement** (débits/pressions, gaz dissous, O_2, CO_2, CH_4, H_2S, etc.)

Ce que cela permet ensuite

- **Valider la stratégie de Génie Pédologique et ses conditions de mise en œuvre et de suivi**
- **Verrouiller les conditions de l'ARR de réception** et garantir la compatibilité sanitaire
- **Arrêter le choix S1 / S2** avec coûts et délais fiabilisés
- **Rédiger les CCTP/DCE** et consulter les entreprises avec critères qualité
- **Réduire les aléas chantier** et sécuriser (conservation de la mémoire, restrictions d'usage)

_Pour finir



Crédit : Marie Sculo GINGER BURGEAP

Pour finir

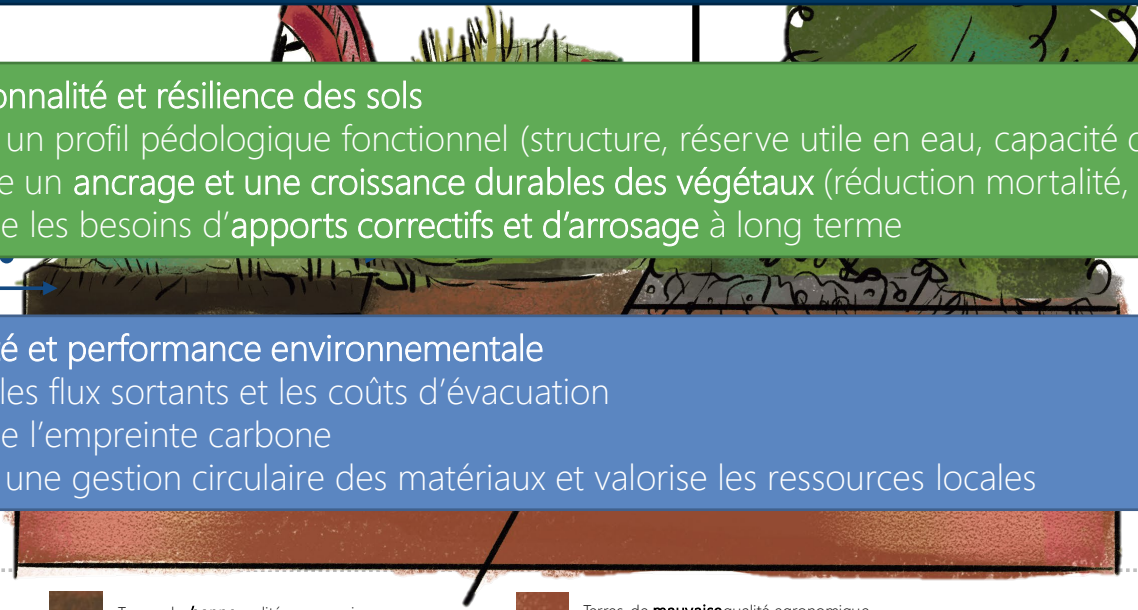
Hors source concentrée de pollution
Remblais avec métaux/métalloïdes lourds

Source concentrée de pollution
Hydrocarbures au sens large

Sécurité sanitaire maîtrisée
- Intègre les contraintes de pollution dès la conception du sol
- Permet de **réutiliser des terres** tout en maintenant la compatibilité avec les usages projetés
- Complète les mesures de confinement ou de recouvrement pour une protection durable des usagers

Fonctionnalité et résilience des sols
- Recrée un profil pédologique fonctionnel (structure, réserve utile en eau, capacité d'échange)
- Favorise un **ancrage et une croissance durables des végétaux** (réduction mortalité, limitation poussières)
- Diminue les besoins d'**apports correctifs et d'arrosage** à long terme

Sobriété et performance environnementale
- Réduit les flux sortants et les coûts d'évacuation
- Diminue l'empreinte carbone
- Facilite une gestion circulaire des matériaux et valorise les ressources locales



Terres de ***bonne*** qualité agronomique

Terres de **mauvaise** qualité agronomique

Crédit : Marie Sculo GINGER BURGEAP

Contact

Guillaume HOSTYN
Chef de projets – Pôle Génie Ecologique

06 32 36 62 61
g.hostyn@groupeginger.com

