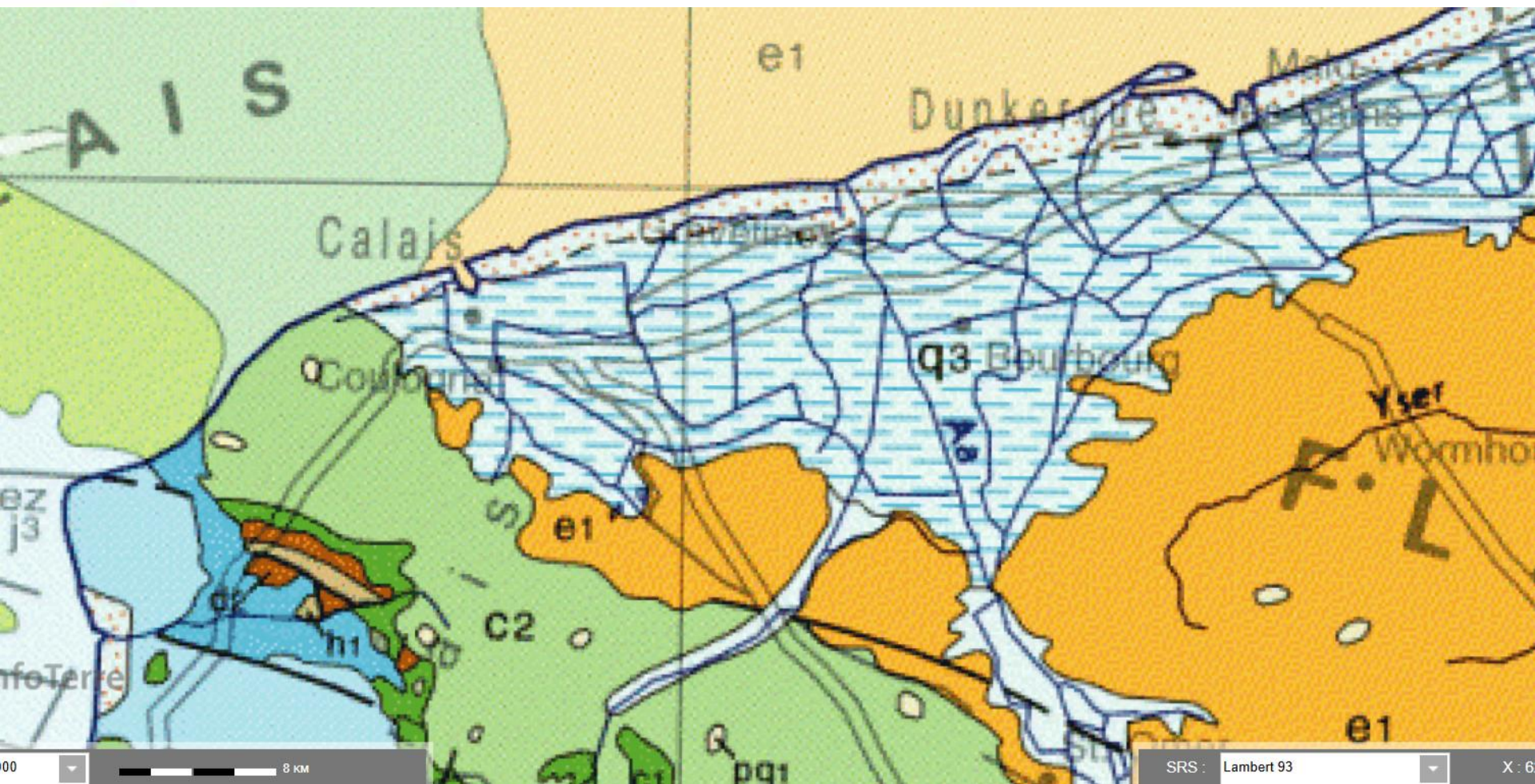


TRAITEMENT DES SOLS EN PLACE AUX LIANTS HYDRAULIQUES

Valéry FERBER



REGARD SUR LA GÉOLOGIE LOCALE



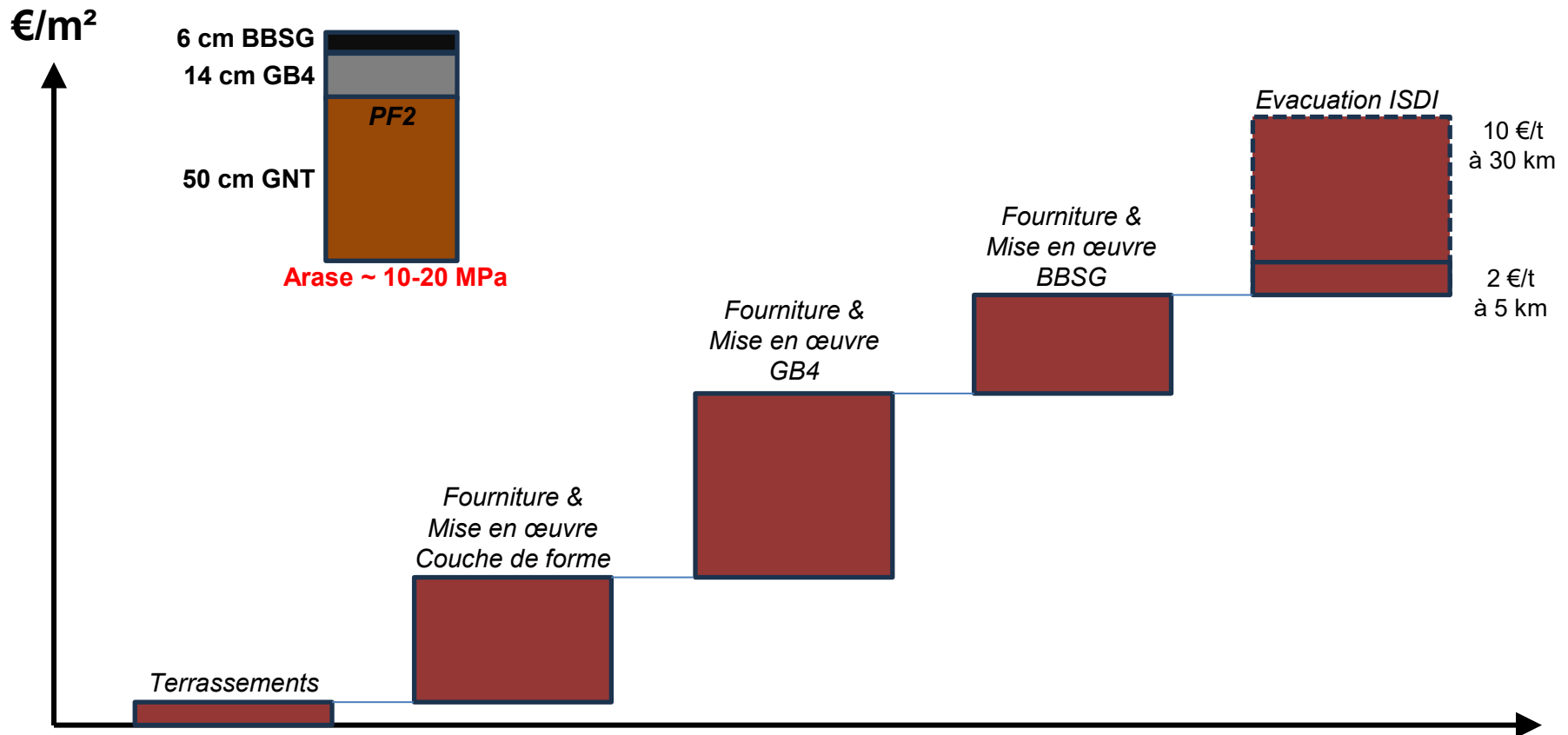


APPROCHE ÉCONOMIQUE



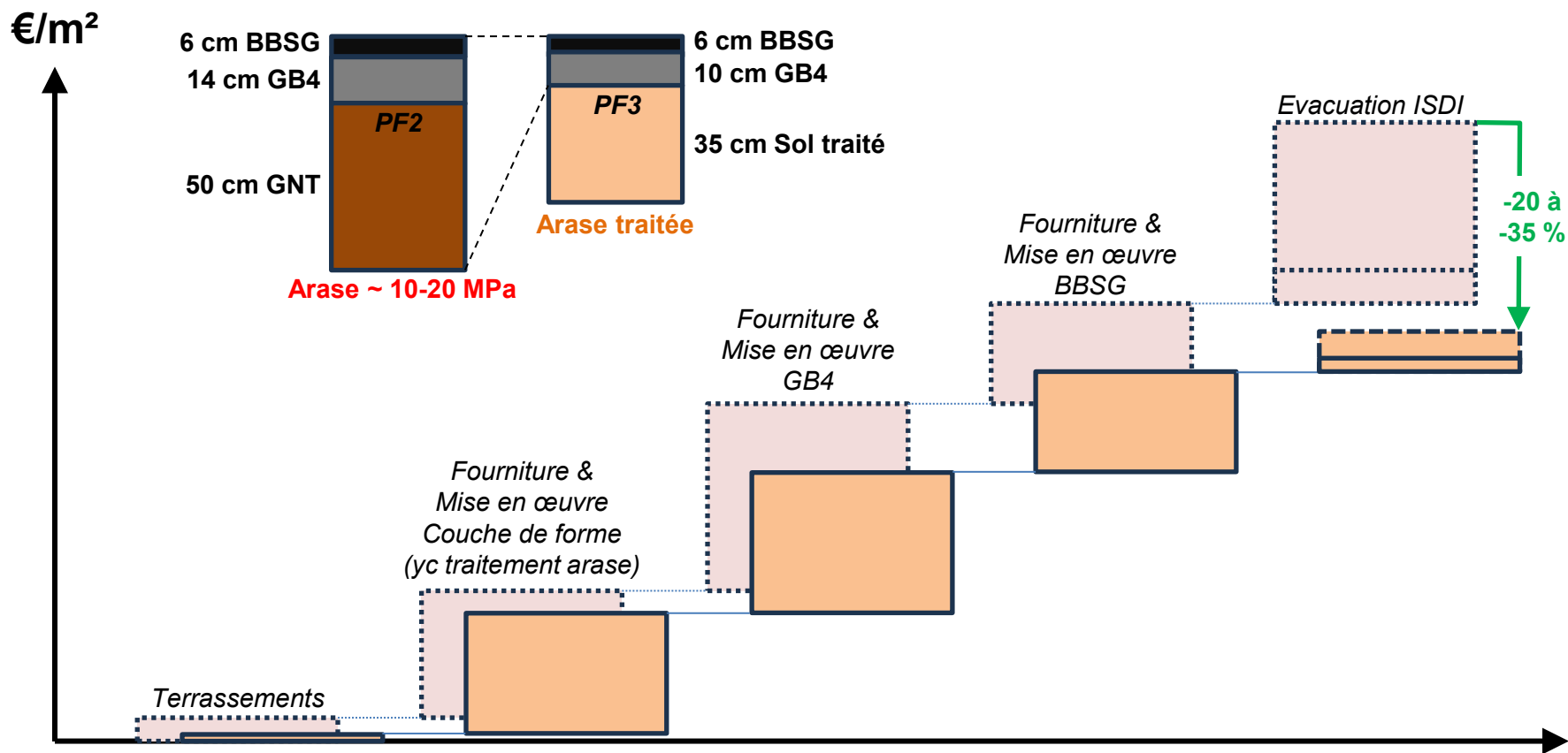
LA SOLUTION TRADITIONNELLE GRANULAIRE

Couche de forme GNT sur **arase PEU portante**



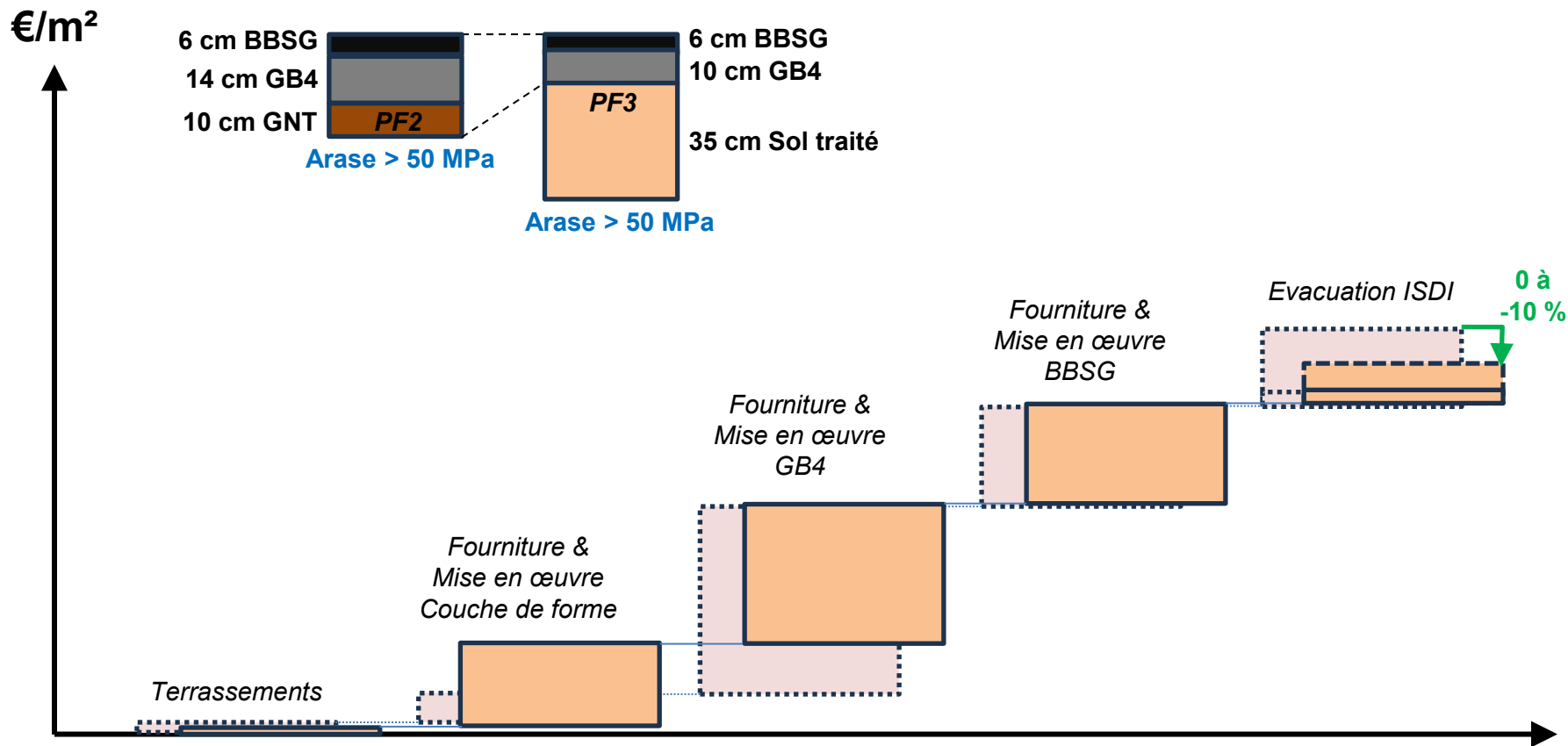
COMPARAISON GRANULAIRE/TRAITEMENT

Couche de forme traitée sur **arase traitée**



COMPARAISON GRANULAIRE/TRAITEMENT

Couche de forme GNT sur **arase naturelle portante**





ÉTAT DE L'ART





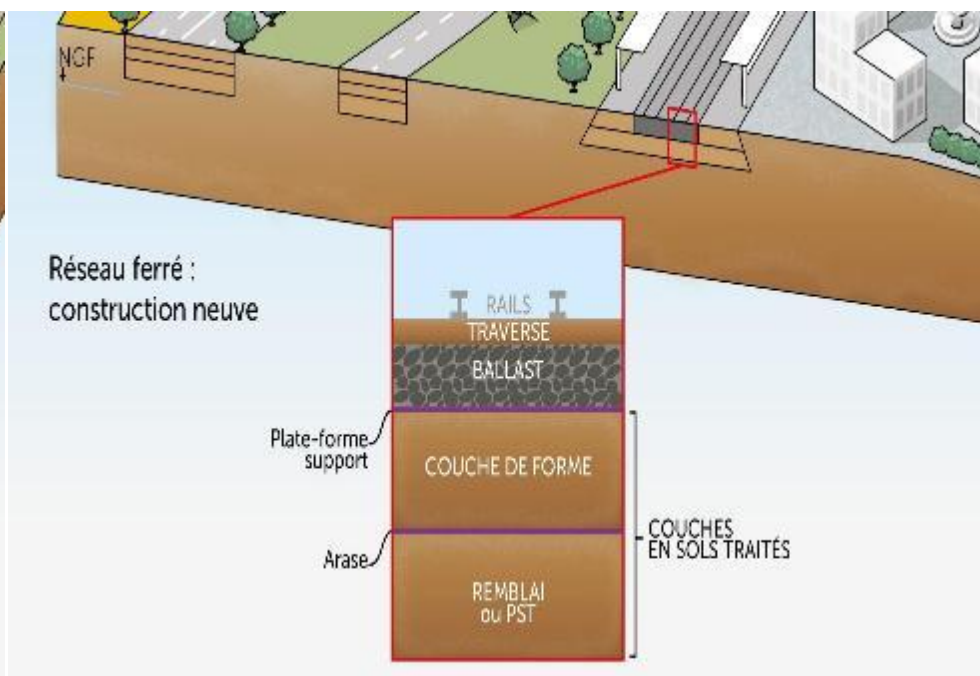
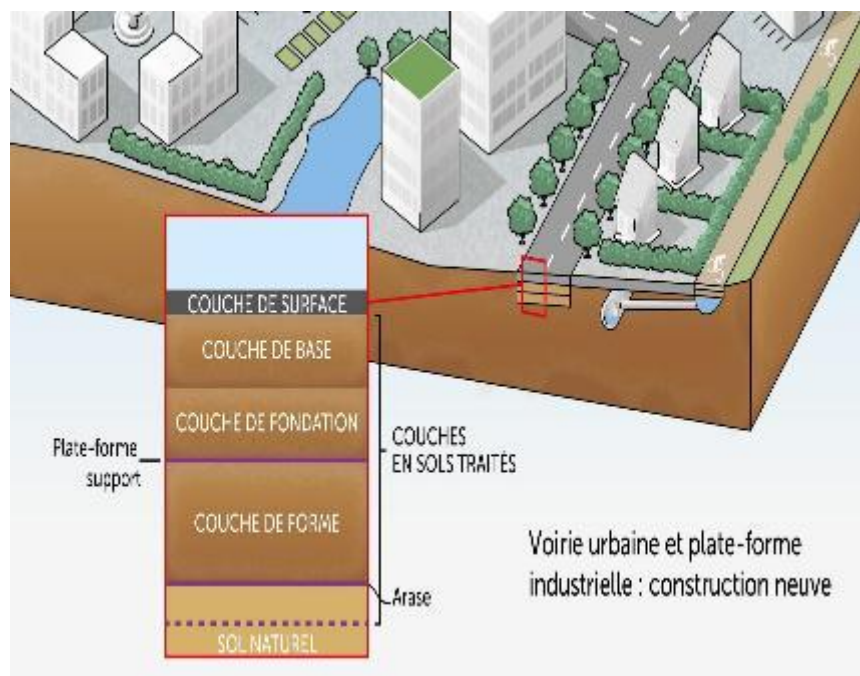
MARCHÉ DU TRAITEMENT DE SOLS


- ❑ **SURFACES IMPORTANTES** : 10 à 15 millions de m² / an (en France)
- ❑ **TECHNIQUE CODIFIÉE** : guides, normes, DTU...
- ❑ **REALISATION MAÎTRISÉE** : entreprises compétentes, procédés fiables, matériels performants, retours d'expérience...
- ❑ **FORTE VARIABILITE GÉOGRAPHIQUE** : les régions « riches » en granulats vs les bassins sédimentaires (Parisien, Aquitain, ...)
- ❑ **ÉVOLUTIONS DES PRATIQUES** : Déblai/Remblais, Arase, Couche de forme, Couches d'assise



APPLICATIONS

- Routes (urbaines, inter-urbaines, autoroutières, forestières...)
- Pistes cyclables
- Plate-formes (industrielles, commerciales, multimodales, parkings..)
- Voies ferrées (LGV..)





OBJECTIFS – INTÉRÊTS

❑ OBJECTIFS :

conférer à un sol naturel des propriétés géotechniques et des performances mécaniques à court et/ou à long terme (qu'il ne possède pas à l'état naturel).

❑ INTÉRÊTS : pouvoir valoriser les sols naturels du site =>

- préservation des ressources en matériaux granulaires,
- diminution des excédents de terrassements et évacuation en ISDI,
- Réduction des transports





EFFETS DU TRAITEMENT

Le matin, avant traitement



Le soir, après traitement





ÉTUDES ET DIMENSIONNEMENT





ÉTUDES PRÉALABLES - FAISABILITE

☐ HOMOGENEITE DU GISEMENT

☐ CHOIX DU LIANT HYDRAULIQUE ROUTIER (NF EN 13282 - 1 / 2 / 3)

- **composition** : clinker (K), laitier HF (S), CaO, CV (V), fillers calcaires (L), pouzzolane (P), schistes calcinés (T)...
 - **classes de résistances**
 - **délai de maniabilité** (délai de début de prise du liant) : 4 à 6 heures
- NB : liants « particuliers » : à émission de poussières réduite, bas carbone

☐ ESSAI D'APTITUDE AU TRAITEMENT (NF P 94-100)

- **objectif** : déterminer l'aptitude d'un sol à « réagir » positivement au traitement avec un liant hydraulique (mesures du gonflement Gv% et de la résistance Rit).
- **intérêt** : réponse rapide, moins de 2 semaines (essais à 40°).
- **limite** : résultats mécaniques non utilisables pour le dimensionnement.

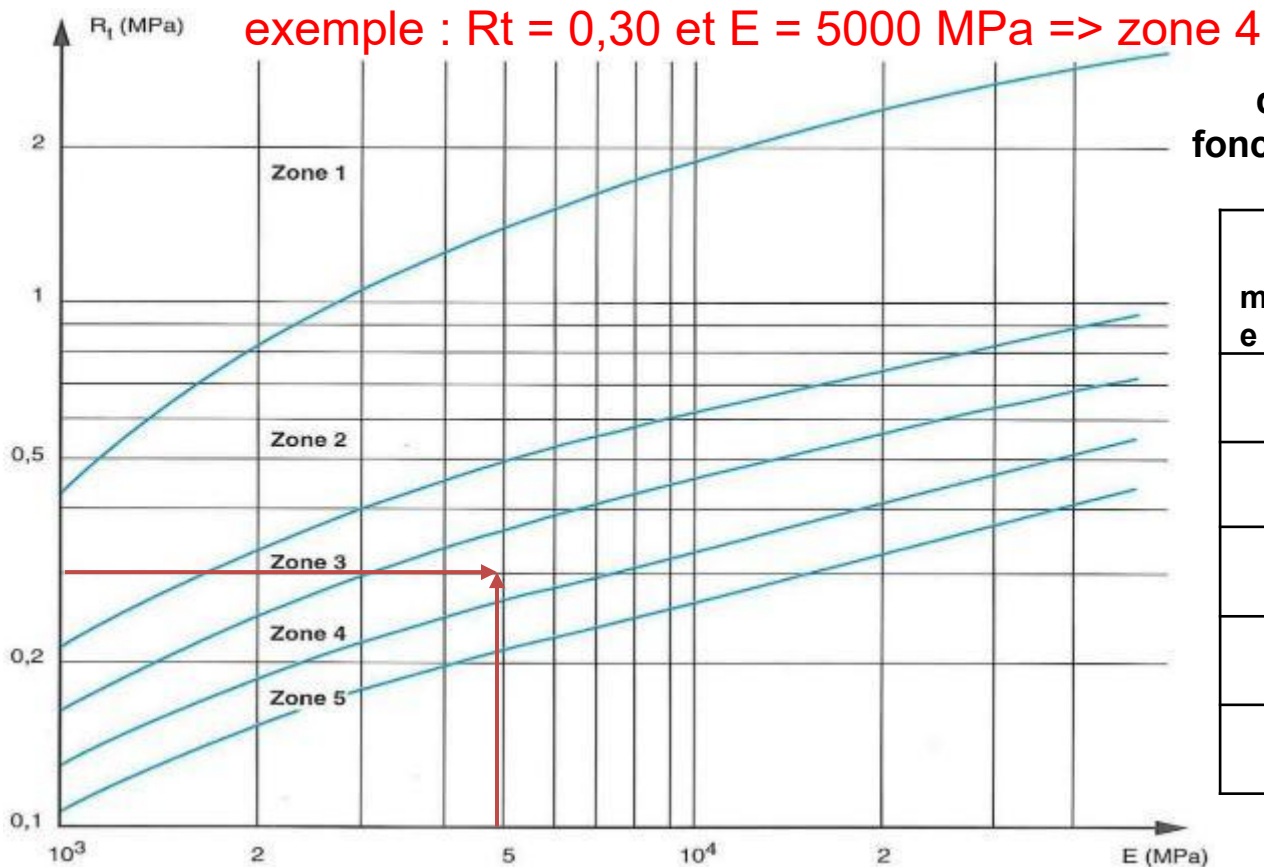


ÉTUDES DE FORMULATION

Niveaux des Etudes		Nature de l'ouvrage	
Caractéristiques		PST / AR - remblais techniques	Couche de Forme / Assises de Chaussées
Niveau 1	Circulation possible	$R_c > 1 \text{ MPa}$ (1,5 à 2 MPa pour des trafics lourds)	
	Mélange non gélif (si nécessaire)	$R_{it} (R_{tB}) > 0,25 \text{ MPa}$	
	Mélange insensible à l'eau	$CBR_{im} (4 \text{ j}) > IPI$	$R_{c-im} (28+32) / R_c (\text{à } 60 \text{ j}) :$ - soit $> 0,8$ si $VBs < 0,5$ - soit $> 0,6$ (ou 0.7 pour assises de chaussées) si $VBs > 0,5$
	Caractéristiques mécaniques	$R_{it} > 0.20 \text{ MPa}$ (selon P 94-100 / caractérise l'obtention d'une « prise »)	$R_{t/E}$ à 90 j : classe 4 minimum (traitement en place) (avec, pour assises de chaussées abattement de 25 ou 35% en fonction de la « qualité » du matériel utilisé)
Niveau 2	Sensibilité aux variations	-	variations du dosage, de la teneur en eau et de la masse volumique (compacité)

DIMENSIONNEMENT "COUCHE DE FORME" (1)

DIAGRAMME « R_t / E » - classes / zones mécaniques



définition « classe / zone » en fonction de la méthode de traitement

Classe mécanique	Traitement en centrale	Traitement en place
1	Zone 1	
2	Zone 2	Zone 1
3	Zone 3	Zone 2
4	Zone 4	Zone 3
5	Zone 5	Zone 4

$$R_t = R_{it} \times 0,8$$

DIMENSIONNEMENT « COUCHE DE FORME » (2)

ÉPAISSEUR (cm)
selon classe d'arase et classe mécanique du sol traité

Classe AR		AR1				AR2		
Portance court terme		35 MPa				50 MPa		
Classe mécanique	3			30	40 ⁽¹⁾		25	30
	4	30	35	35	45 ⁽¹⁾	25	30	35
	5	35	45 ⁽¹⁾	50 ⁽¹⁾	55 ⁽¹⁾	30	35	45 ⁽¹⁾
Classe de plateforme		PF2	PF2qs	PF3	PF4	PF2qs	PF3	PF4

(1) la compacité recherchée en fond de couche conduit généralement à une mise en œuvre en 2 couches.

Référentiel : GTR, Guide des terrassements des remblais et des couches de forme, IDRRIM, 2023



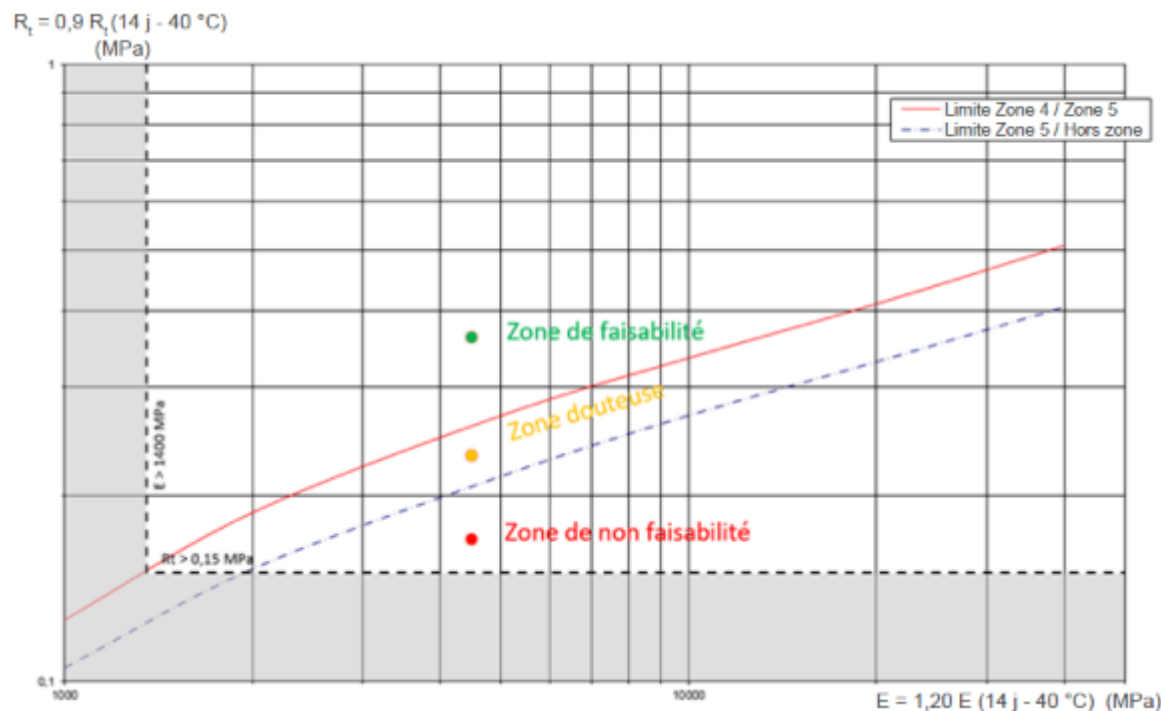
DIMENSIONNEMENT DE COUCHE DE FORME

MÉTHODE ACCÉLÉRÉE

■ Nouvelle méthode d'étude : essais accélérés

Note IDRRIM n°52, Sept 2024, "Sols traités aux liants hydrauliques : étude de formulation accélérée"

*Une étude « sols traités aux liants hydrauliques : procédure d'essais accélérés en laboratoire » (CEREMA, CIMBETON, SPTF, RdF, UPC) a permis de valider la réduction des délais de réponse de l'étude à **14 jours** (actuellement 90 jours).*





MISE EN OEUVRE



HUMIDIFICATION

❑ OBJECTIF

obtenir la teneur en eau nécessaire à l'hydratation du LHR : elle est définie par l'étude de laboratoire

❑ MOYENS

- **arroseuse "queue de carpe"** : arrosage en surface (répartition « anarchique »)
=> à proscrire
- **arroseuse-enfouisseuse** : répartition plus homogène (sauf en cas de pente),
- **injection dans la cloche du malaxeur** : répartition homogène (surface et épaisseur).



Enfouisseuse



injection d'eau dans la cloche du malaxeur

ÉPANDAGE DU LIANT

❑ OBJECTIF :

répartition uniforme du liant (longitudinalement et transversalement).

❑ MOYENS :

épandeur asservi (quantité épandue indépendante de la vitesse d'avancement),
à dosage pondéral et à largeur variable

la précision est caractérisée par le coefficient de variation C_v (moyenne / écart type).



❑ QUANTITE A EPANDRE :

$$Q \text{ (kg/m}^2\text{)} = e \text{ (m)} \times mv \text{ (t/m}^3\text{)} \times \frac{1\,000 \times d\%}{(100 - d\%)}$$

MALAXAGE

OBJECTIFS :

- décohesionner ou fragmenter les matériaux en place.
- mélanger de façon homogène ces matériaux avec le(s) liant(s) et l'eau.

EPAISSEURS TRAITEES (LH)

- $\leq 0,40$ m en 1 couche
- au-delà : 2 ou plusieurs couches

MOYENS MATERIELS



COMPACTAGE

- ❑ **OBJECTIF** : obtenir la compacité visée (q_3 en couche de forme, 98,5 % de TC)
- ❑ **COMPACTEURS** :
 - **compacteur vibrant monobille** :
 - **compacteur à pneus** : densification de surface et lissage de la plate- forme (contribue à réduire le feuilleteage).



RÉGLAGE FIN / NIVELLEMENT

❑ OBJECTIFS « COURANTS » :

- Arase de terrassements : +/- 5 cm
- couche de forme :
 - réglage classique : +/- 2 cm
 - réglage fin : +/- 1 cm

❑ MATERIELS :

- niveleuse
- (exceptionnellement raboteuse)

❑ REALISATION : ENLÈVEMENT DES MATERIAUX

- niveleuse : immédiatement après compactage (avant la prise),
- raboteuse : après la prise (quelques jours à).



PROTECTION DE LA PLATE-FORME TRAITÉE

❑ OBJECTIFS :

- éviter la déshydratation de surface,
- protéger contre la pluie et les dégradations de surface,
- éviter la microfissuration

❑ MOYENS / PRODUITS DE CURE :

- **eau** : arrosage pour maintenir la teneur en eau en surface.
- **émulsion de bitume** (60 à 65%) : protection contre l'évaporation et la pluie

❑ GRAVILLONNAGE

uniquement en cas de circulation



émulsion de bitume



gravillonnage





CONTRÔLES PENDANT LE TRAITEMENT (1)

- ❑ **TENEUR EN EAU** (matériau naturel et après chaque arrosage/ malaxage)
 - gamma-densimètre, poêle.
- ❑ **LIANTS :**
 - quantité épandue : bac (ou bâche) et bouclage journalier,
 - réactivité de la chaux,
 - auto-contrôle du fabricant (éventuellement prélèvements conservatoires)
 - mesure de l'envol de poussières (si nécessaire)
- ❑ **MALAXAGE :**
 - épaisseur : repère sur pulvi-mixer / mesure en place (relevage rotor)
 - homogénéité : couleur
 - finesse de la mouture (fraction fine argilo-limoneuse $< 0,4$ mm) :
 - pour un remblai ou une PST : $D \leq 80$ à 100 mm,
 - pour une couche de forme : $D \leq 20$ à 40 mm



CONTRÔLES APRÈS LE TRAITEMENT (2)

□ COMPACTAGE :

- Q / S
- densités et teneurs en eau en place : gamma-densimètre

□ QUALITE DU TRAITEMENT :

- mesure de la déflexion :

DEFLEXIONS MAXIMALES (sous essieu de 13 tonnes)			
	CaO	LHR (avec ou sans CaO)	
	ETAT		EGIS (autoroutes)
PF2	120 / 100 mm	80 / 100 mm	70 / 100 mm
PF2 qs	100 / 100 mm	70 / 100 mm	50 / 100 mm
PF3	80 / 100 mm	60 / 100 mm	40 / 100 mm
PF4		50 / 100 mm	20 / 100 mm

- topographique : altimétrie – largeur
- uni (APL) sur les assises de chaussées



CONTRÔLES - MATÉRIELS (3)



Essai à la plaque



Dynaplaque II



Déflexion



Gammadensimètre



ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE

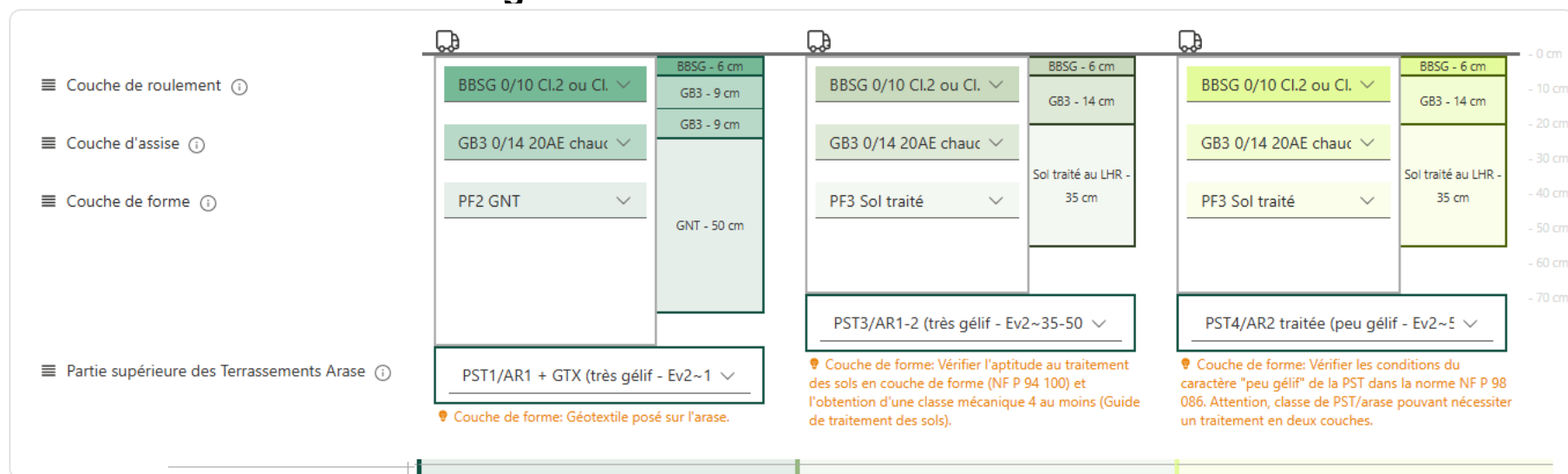


IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU TRAITEMENT

PF2 granulaire sur AR1 et géotextile

PF3 traitée sur AR2 naturelle

PF3 traitée sur AR2 traitée



Coût (k€/1000 m²)	● 56 à 70	● 39 à 49 (-30 à -50%)	● 41 à 51 (-15 à -30%)
Co2 (t eq CO2/1000 m²)	● 40 à 50	● 42 à 52 (0 à +5%)	● 52 à 64 (+15 à +30%)
Ressources (T granulats/1000 m²)	● 1319 à 1614	● 353 à 433 (-50 à -75%)	● 353 à 433 (-50 à -75%)
Trafic PL Chantier (PL/1000 m²)	● 104 à 128	● 30 à 37 (-50 à -75%)	● 30 à 37 (-50 à -75%)
Déchets générés (T/1000 m²)	● 1198 à 1466	● 324 à 397 (-50 à -75%)	● 324 à 397 (-50 à -75%)

INTÉRÊTS PAR RAPPORT AUX MATÉRIAUX GRANULAIRES

□ AVANTAGES

- réduction d'épaisseur à performances équivalentes,
- performances mécaniques plus élevées (PF3 à PF4),
- meilleure protection vis à vis du gel

□ CONTRAINTES

- mise en œuvre plus « technique »,
 - mise en œuvre tributaire des conditions météorologiques (pluie, vent, gel..)
- délais à respecter pour :
 - avoir une résistance suffisante pour pouvoir circuler
 - bénéficier de l'insensibilité à l'eau et au gel.
- **fissuration** : risque faible (module faible)



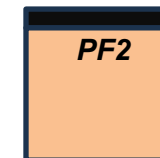
Epaisseurs couche de forme :
- GNT = 0,50 m (à gauche)
- Sol traité = 0,35 m (à droite)



QUELQUES CAS D'APPLICATION



UN STATIONNEMENT VL DE 3000 m²

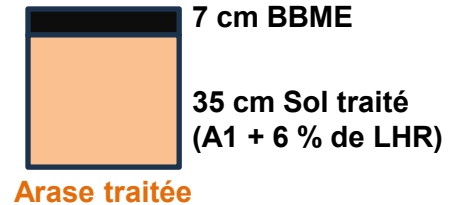


5 cm BBSG

35 cm Sol traité
(A2-A3 h + 3,5 % de chaux)

Arase ~ 10-20 MPa

UNE PLATE-FORME INDUSTRIELLE SANS GRAVE BITUME



UNE PLATE-FORME PORTUAIRE RO-RO DÉCONTAMINÉE



5 cm BBSG

35 cm Sol traité
(A1 + 6 % de LHR)

Arase ~ 20-30 MPa



UNE PLATE-FORME DE CHANTIER NAVAL EN VASES TRAITÉES



	BBME
	GB4
	35 cm vase traitée (A1 + 1%CaO + 6 % de LHR)
	35 cm Sol traité (A1 + 4 % de LHR)
	50 cm Sol traité (A1 + 3 % de LHR)



BIBLIOGRAPHIE



BIBLIOGRAPHIE

- *Guide Technique : Réalisations des remblais et des couches de forme - Fascicule I et Fascicule II – SETRA / LCPC, 2023 (révision de la version 1992/2000).*
- *Guide Technique : Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application en remblais et couches de forme – SETRA / LCPC, 2000 (actuellement en cours de révision)*
- *Guide Technique : Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application en assises de chaussées – SETRA / LCPC, 2007.*
- *Guide : Terrassements et assises de chaussées - Traitement des sols aux liants hydrauliques – Collection Technique CIMBETON, 2009.*





SE LANCER DANS LE TRAITEMENT DE SOLS





ÉTUDES

- Prélèvements sur site :
 - Sondages à la pelle
 - Accompagnement labo spécialisé
- Essais de laboratoire sur « petit projet » :
 - Identification du sol (nature, état hydrique)
 - Références de compactage (Essai Proctor)
 - Essai d'aptitude pour différents dosages



MATERIEL MISE EN ŒUVRE : SOLUTIONS POUR UN INVESTISSEMENT LIMITÉ

- *Sous-traitance/Location*

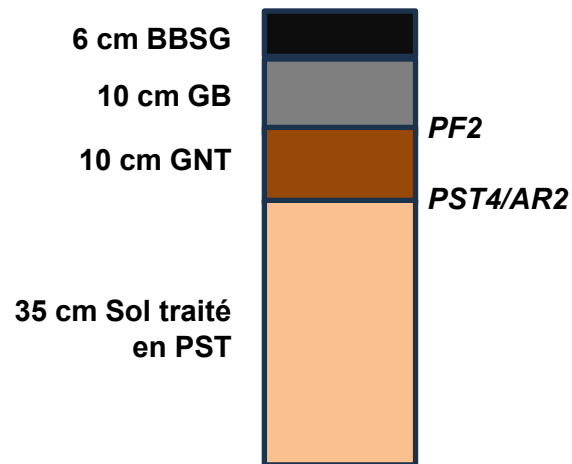


- *Matériel léger*



CONCEPTION : FAIRE SIMPLE

- Etudier des variantes :
 - Alizé + GTR/GTS
 - TALNIA-Voirie
- Solution simple à titre indicatif :



Avantages :

Facile à régler

Traitement protégé par la GNT

Ré-excavable pour réseaux ou fondation



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

