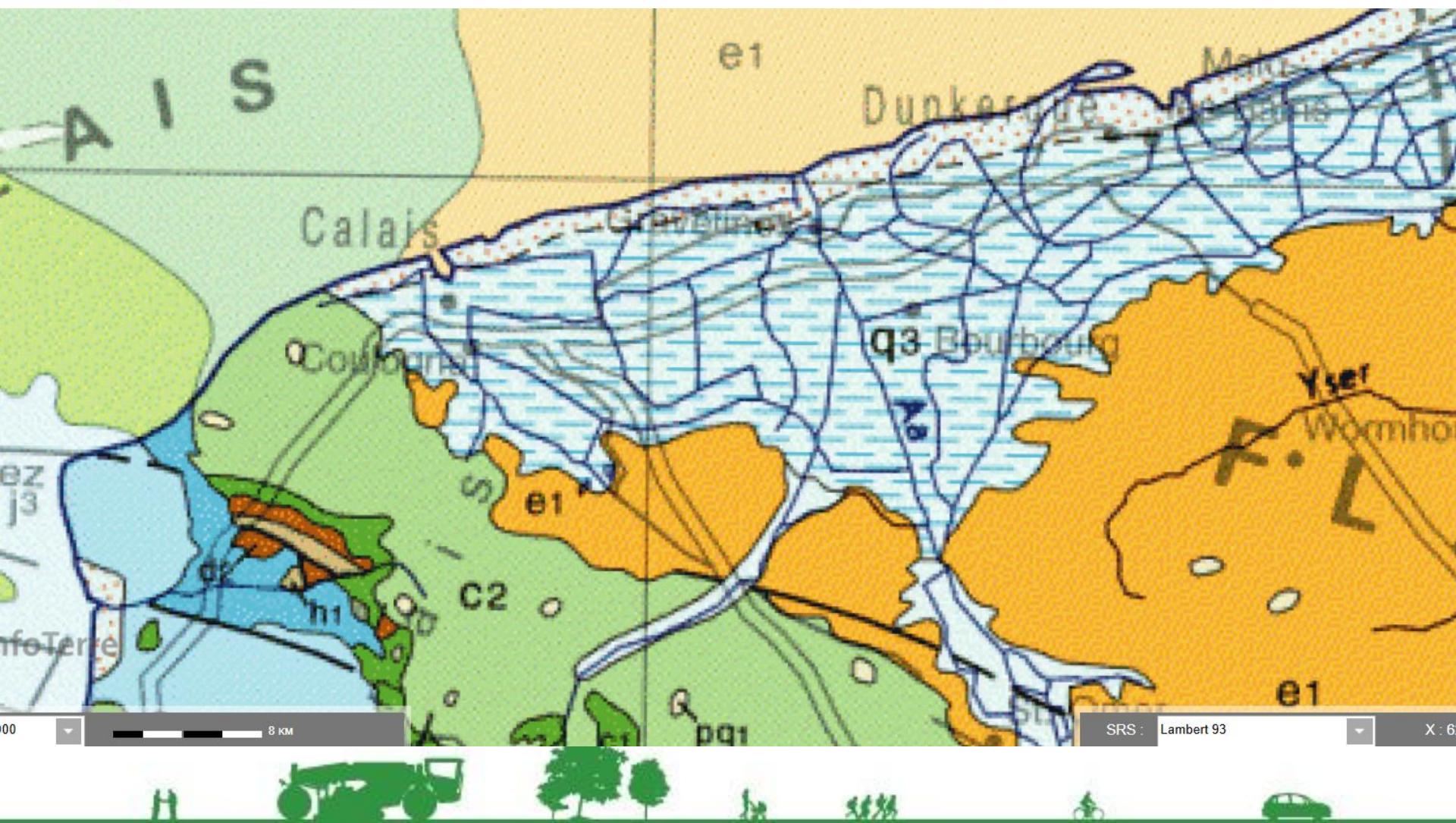


TRAITEMENT DES SOLS EN PLACE AUX LIANTS HYDRAULIQUES

Valéry FERBER



REGARD SUR LA GÉOLOGIE LOCALE



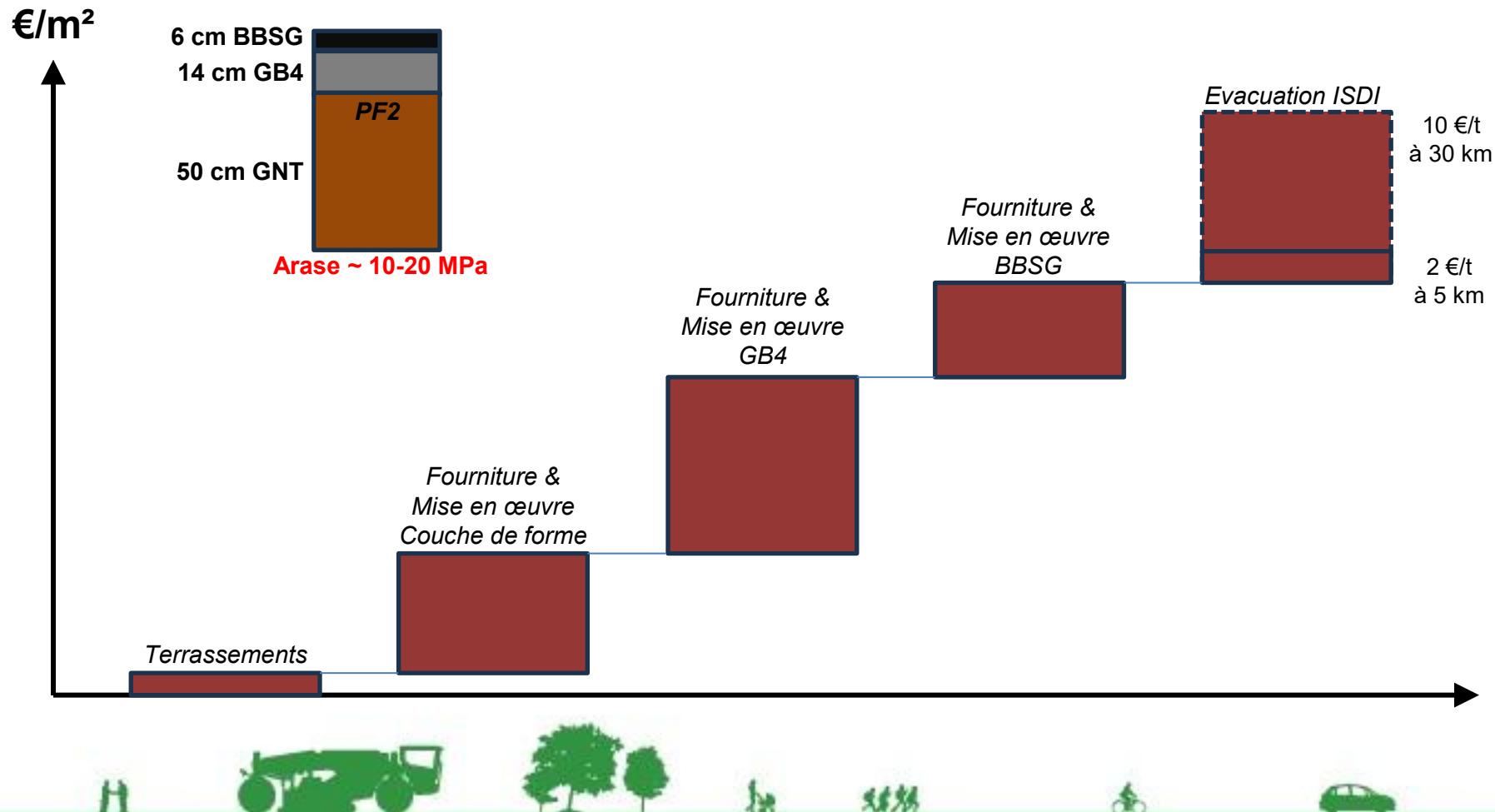


APPROCHE ÉCONOMIQUE



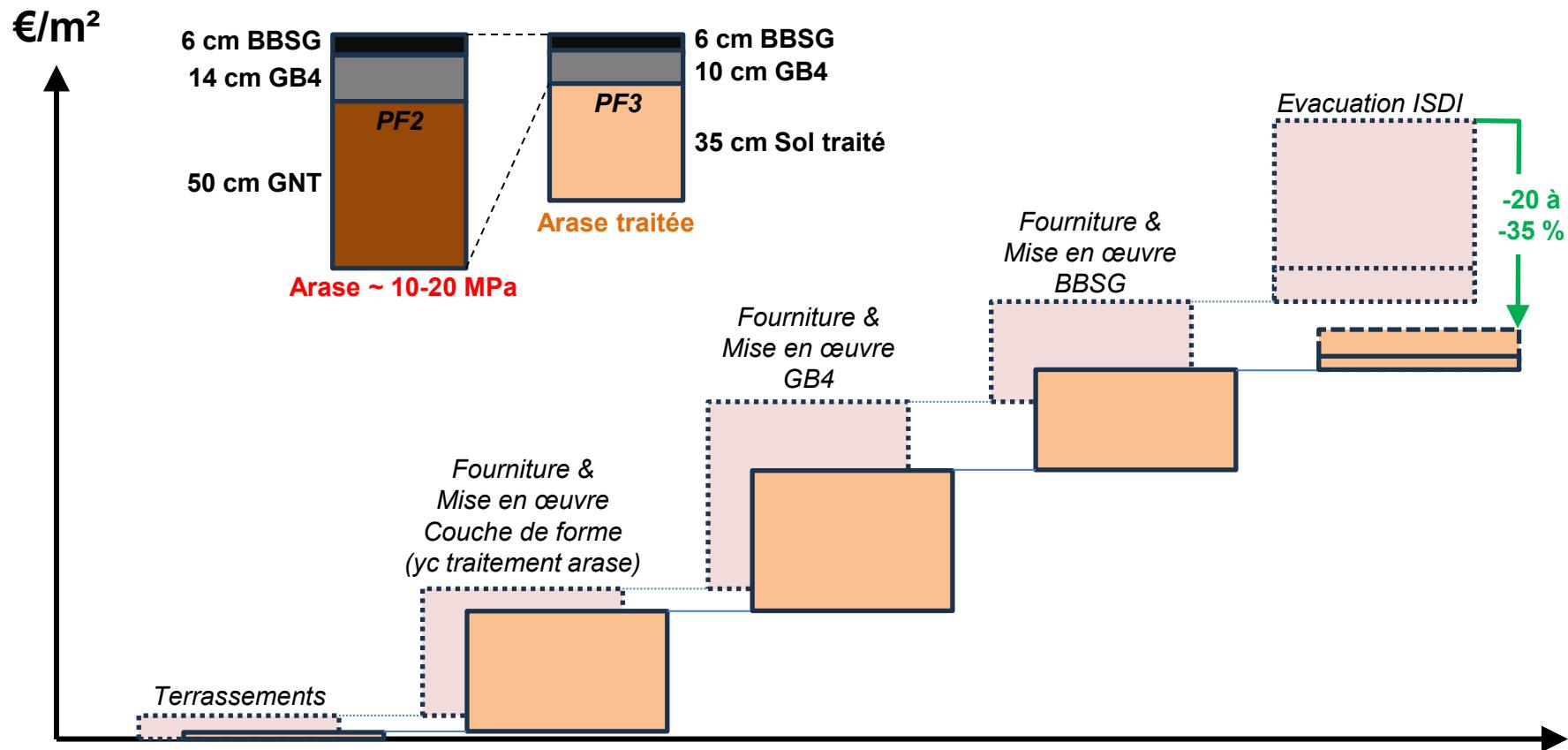
LA SOLUTION TRADITIONNELLE GRANULAIRE

Couche de forme GNT sur arase PEU portante



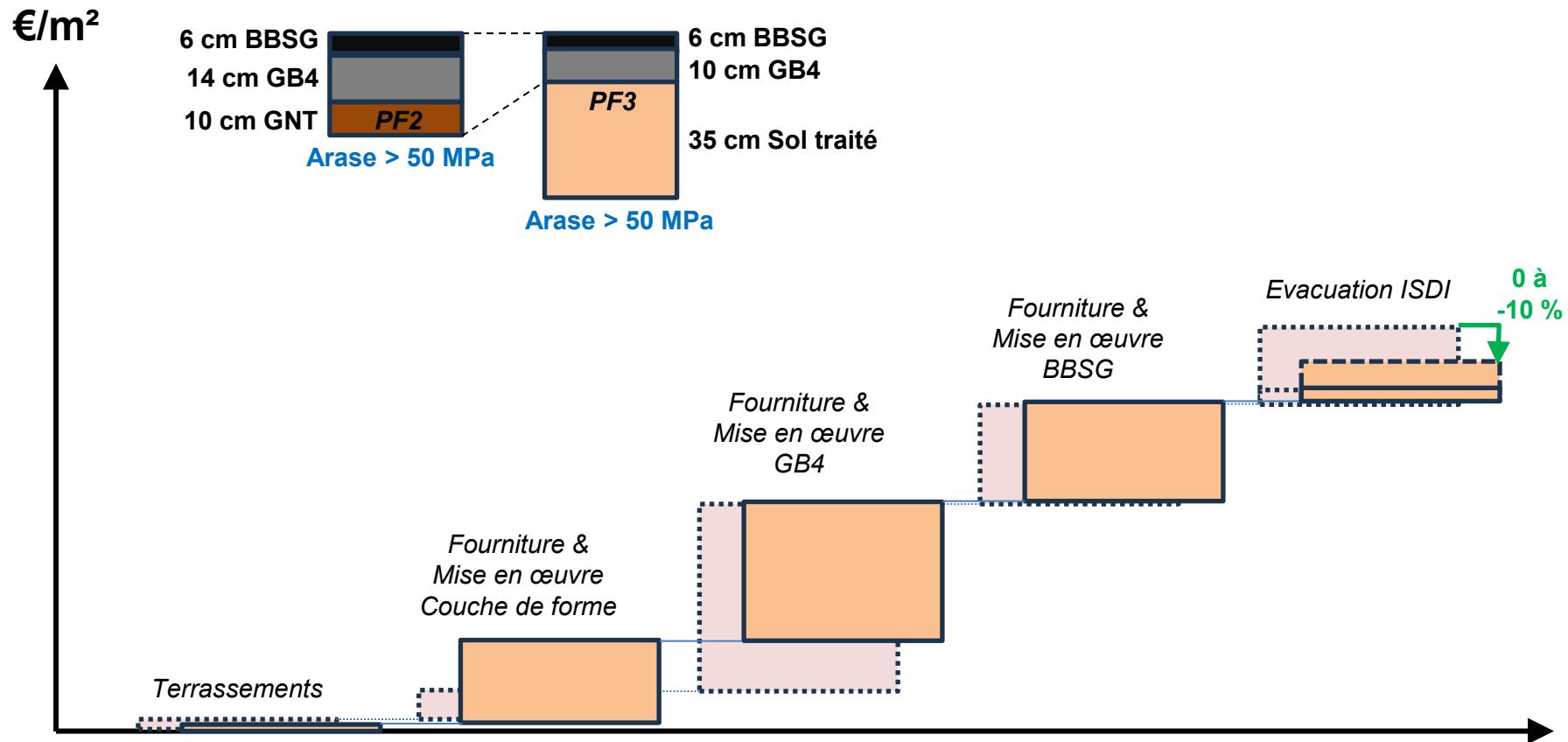
COMPARAISON GRANULAIRE/TRAITEMENT

Couche de forme traitée sur arase traitée



COMPARAISON GRANULAIRE/TRAITEMENT

Couche de forme GNT sur arase naturelle portante





ÉTAT DE L'ART





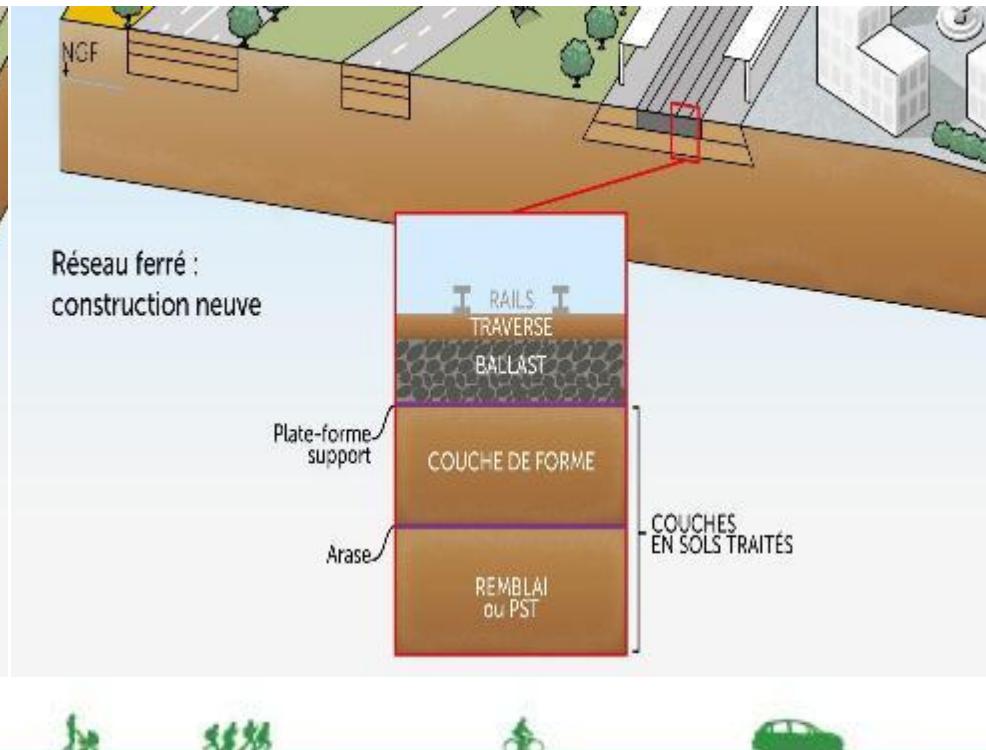
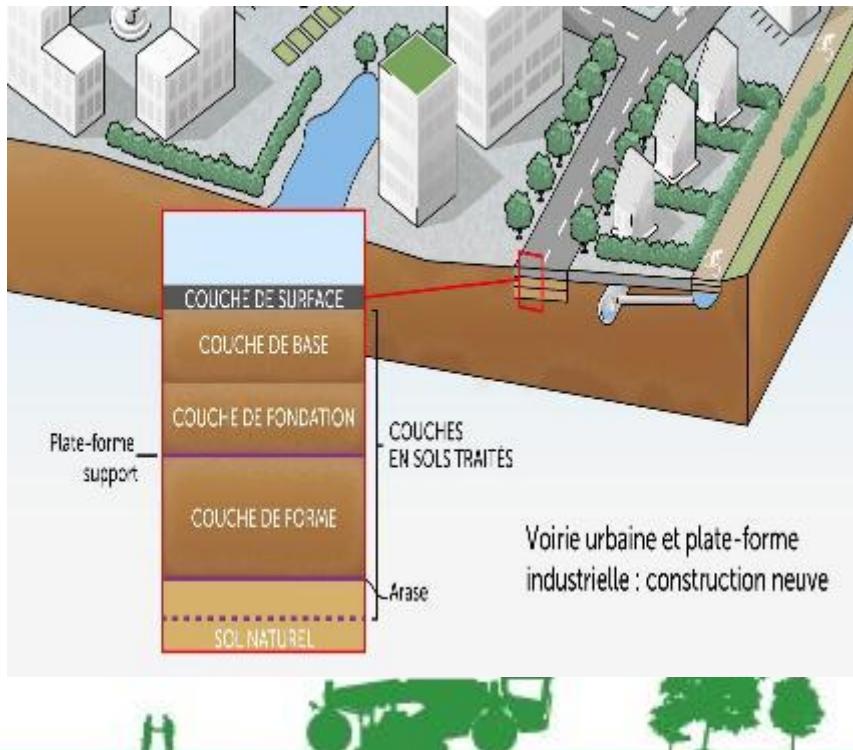
MARCHÉ DU TRAITEMENT DE SOLS

- 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 VARIABILITÉ 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 - FAISABILITÉ

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.

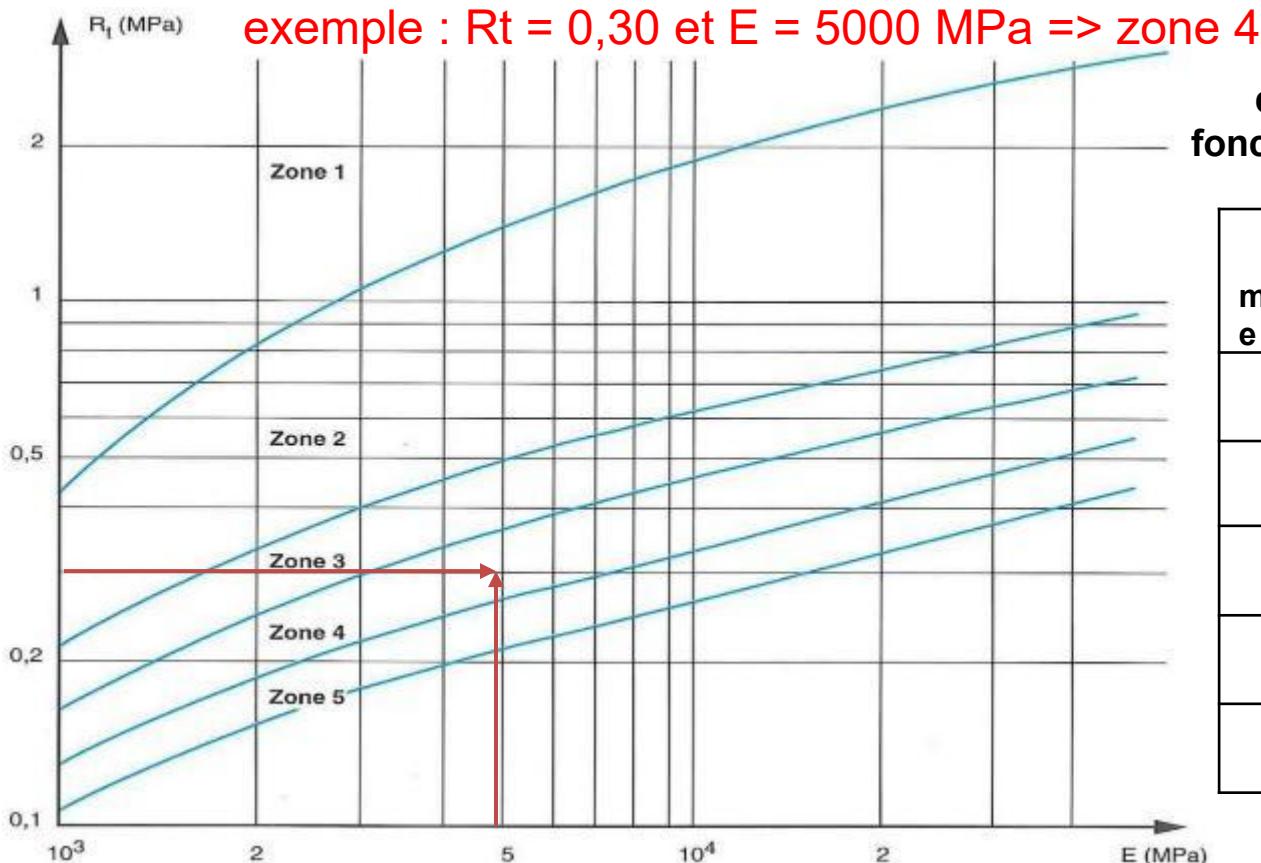


ÉTUDES DE FORMULATION

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 $VB_s < 0,5$ - soit > 0,6 (ou 0.7 pour assises de chaussées) si $VB_s > 0,5$
	Caractéristiques mécaniques	$R_{it} > 0.20 \text{ MPa}$ (selon P 94-100 / caractérise l'obtention d'une « prise »)	$R_{t/E} \text{ à } 90 \text{ j} :$ 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 « Rt / E » - classes / zones mécaniques



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

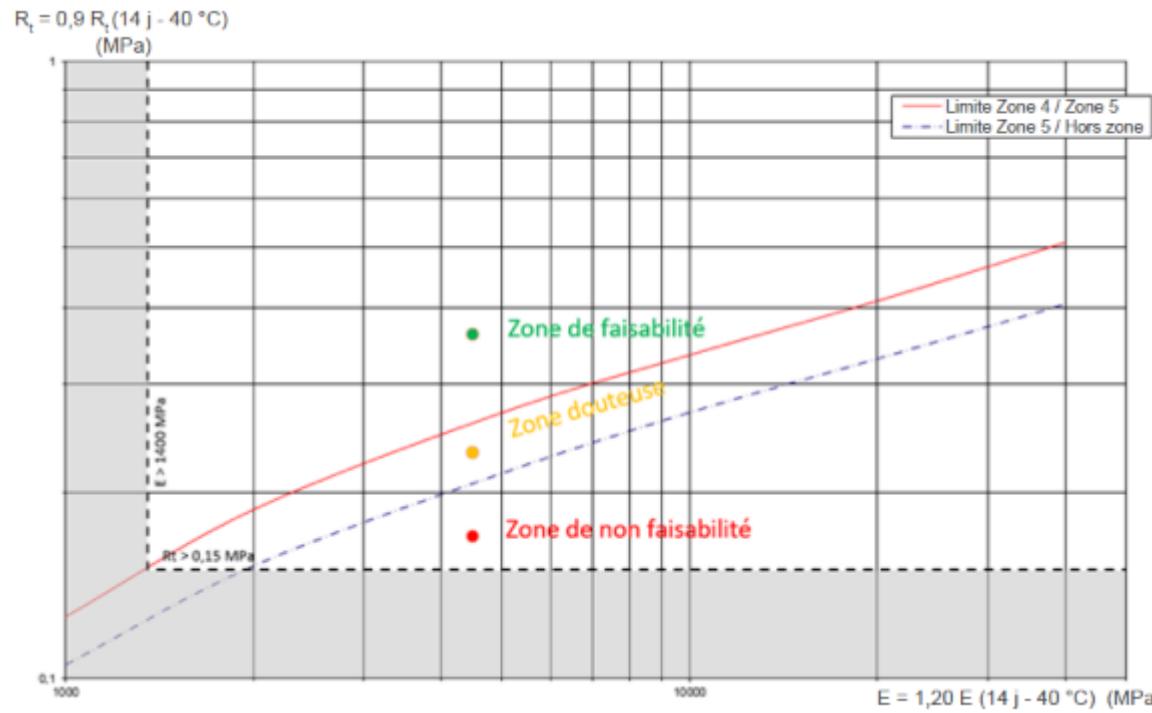


DIMENSIONNEMENT DE COUCHE DE FORME MÉTHODE ACCÉLÉRÉE

- 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

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



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 Cv (moyenne / écart type).



□ QUANTITE A EPANDRE :

$$Q \text{ (kg/m}^2\text{)} = e \text{ (m)} \times mv \text{ (t/m}^3\text{)} \times \frac{1000 \times d\%}{(100 - d\%)}$$



MALAXAGE

OBJECTIFS :

- décohésionner 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



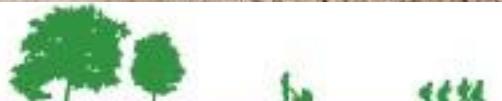
charrue (chaux)



malaxeur tracté



malaxeur automoteur



COMPACTAGE

❑ **OBJECTIF** : obtenir la compacité visée (q3 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 feuilletage).



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



gravillonnage



CONTÔLES 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



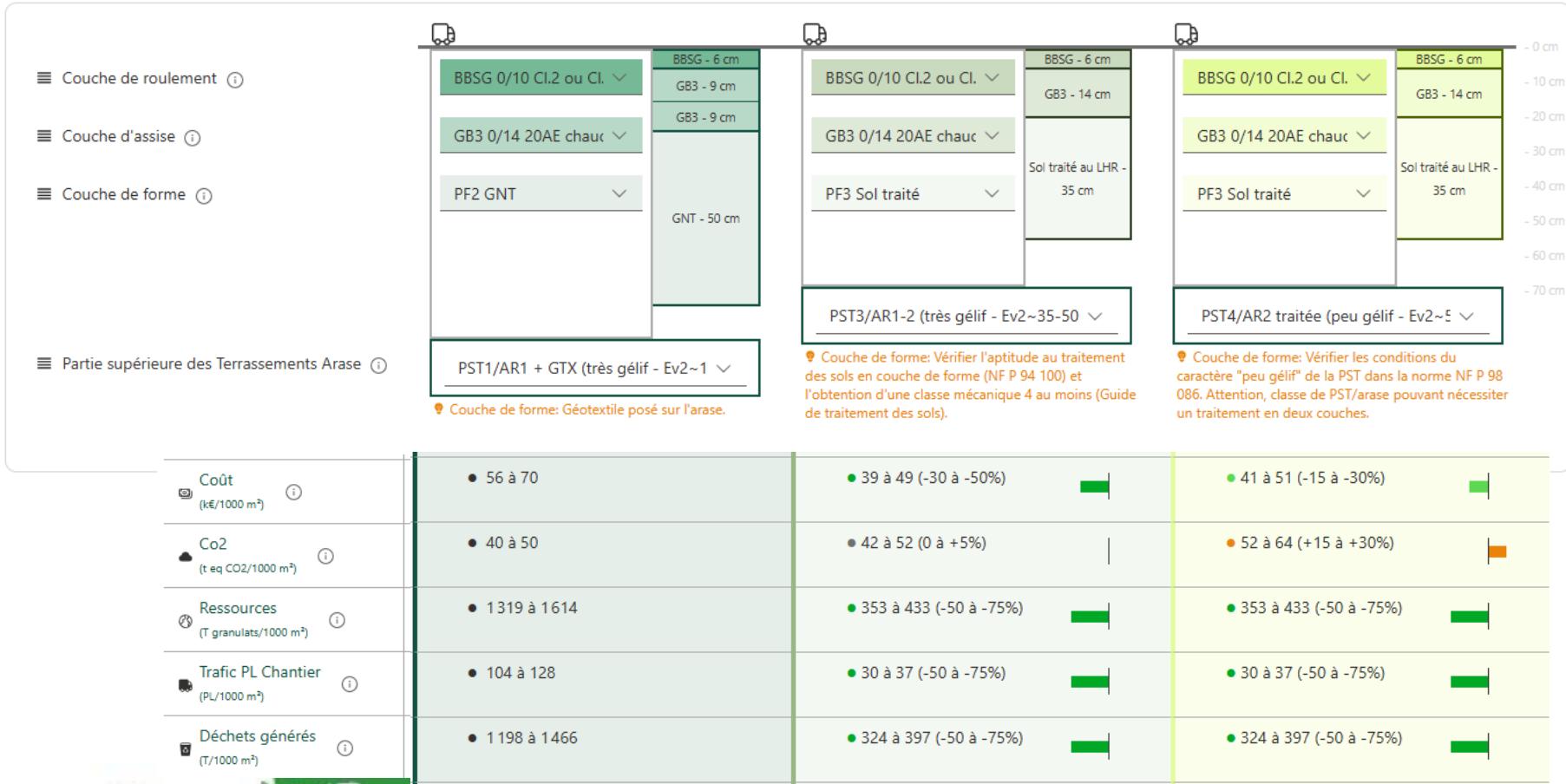


ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE



IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU TRAITEMENT

PF2 granulaire sur AR1 et géotextile



INTÉRÊTS PAR RAPPORT AUX MATERIAUX 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



Arase ~ 10-20 MPa

5 cm BBSG

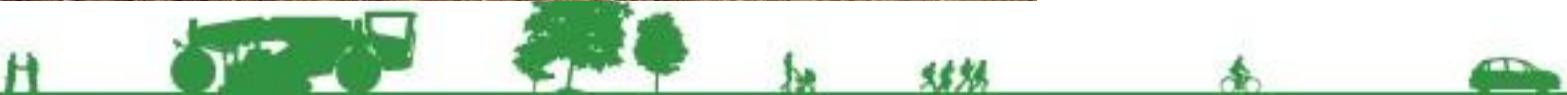
35 cm Sol traité
(A2-A3 h + 3,5 % de chaux)



UNE PLATE-FORME INDUSTRIELLE SANS GRAVE BITUME



7 cm BBME
35 cm Sol traité
(A1 + 6 % de LHR)
Arase traitée



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)



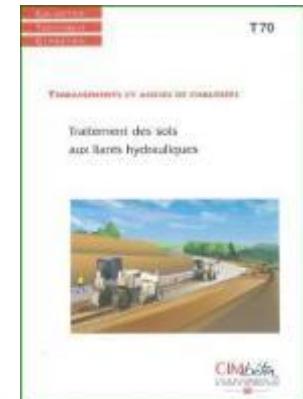
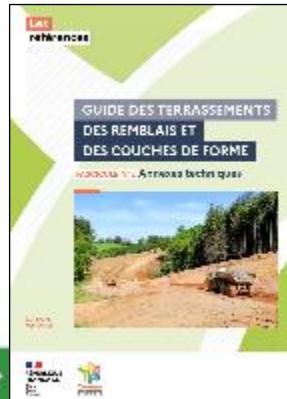
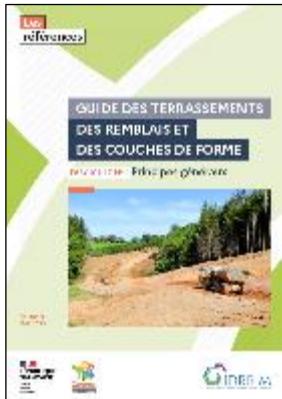


BIBLIOGRAPHIE



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*

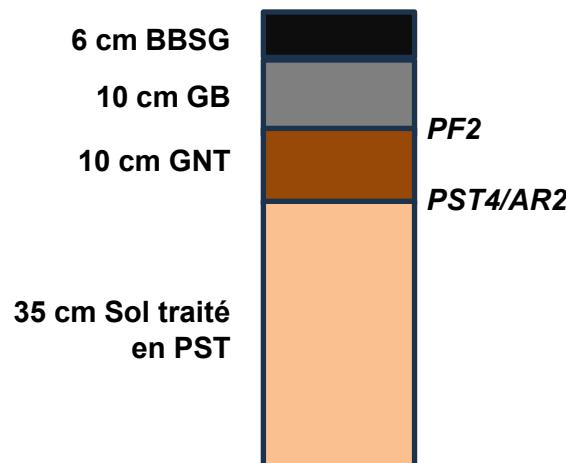


- *Matériel léger*



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

