

TRAITEMENT DES SOLS EN PLACE AUX LIANTS HYDRAULIQUES

Valéry FERBER



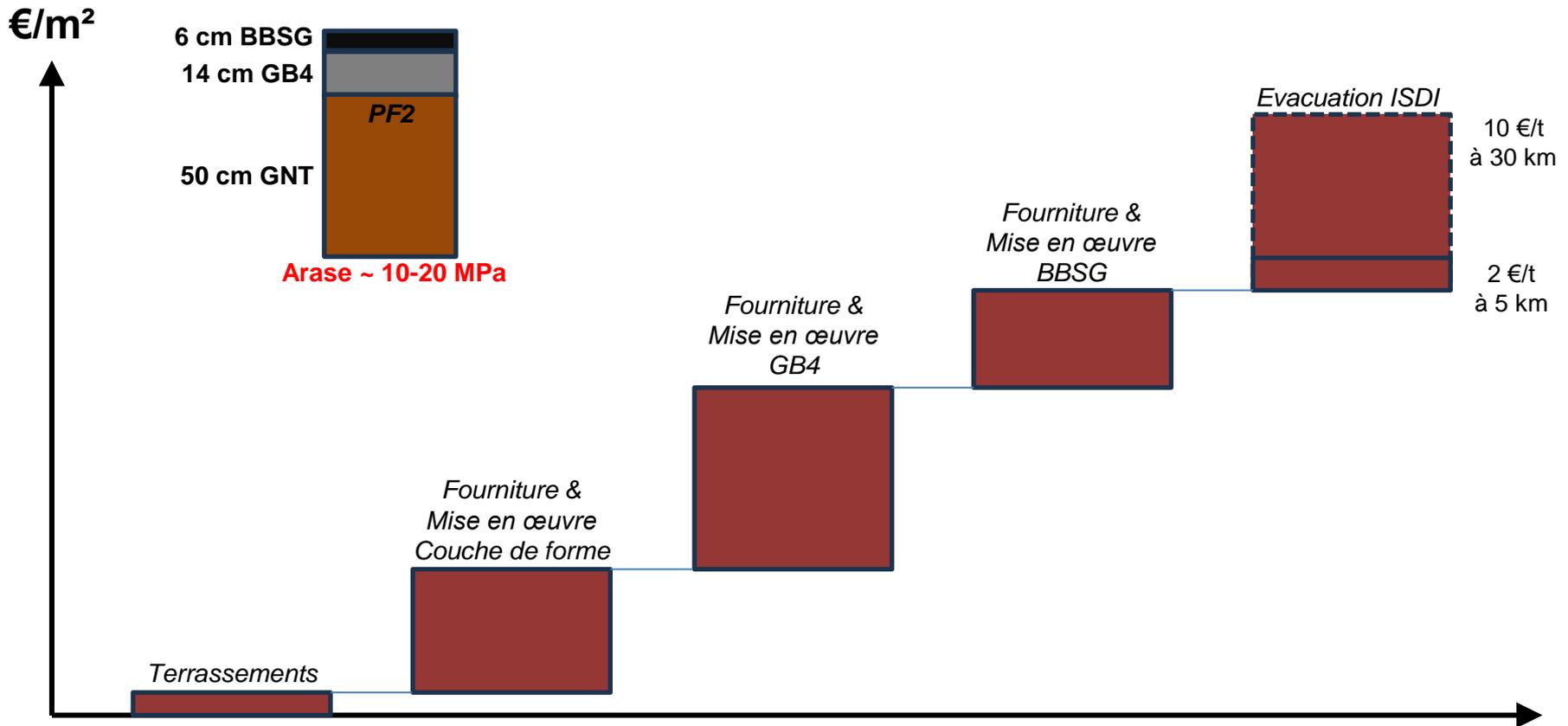


APPROCHE ÉCONOMIQUE



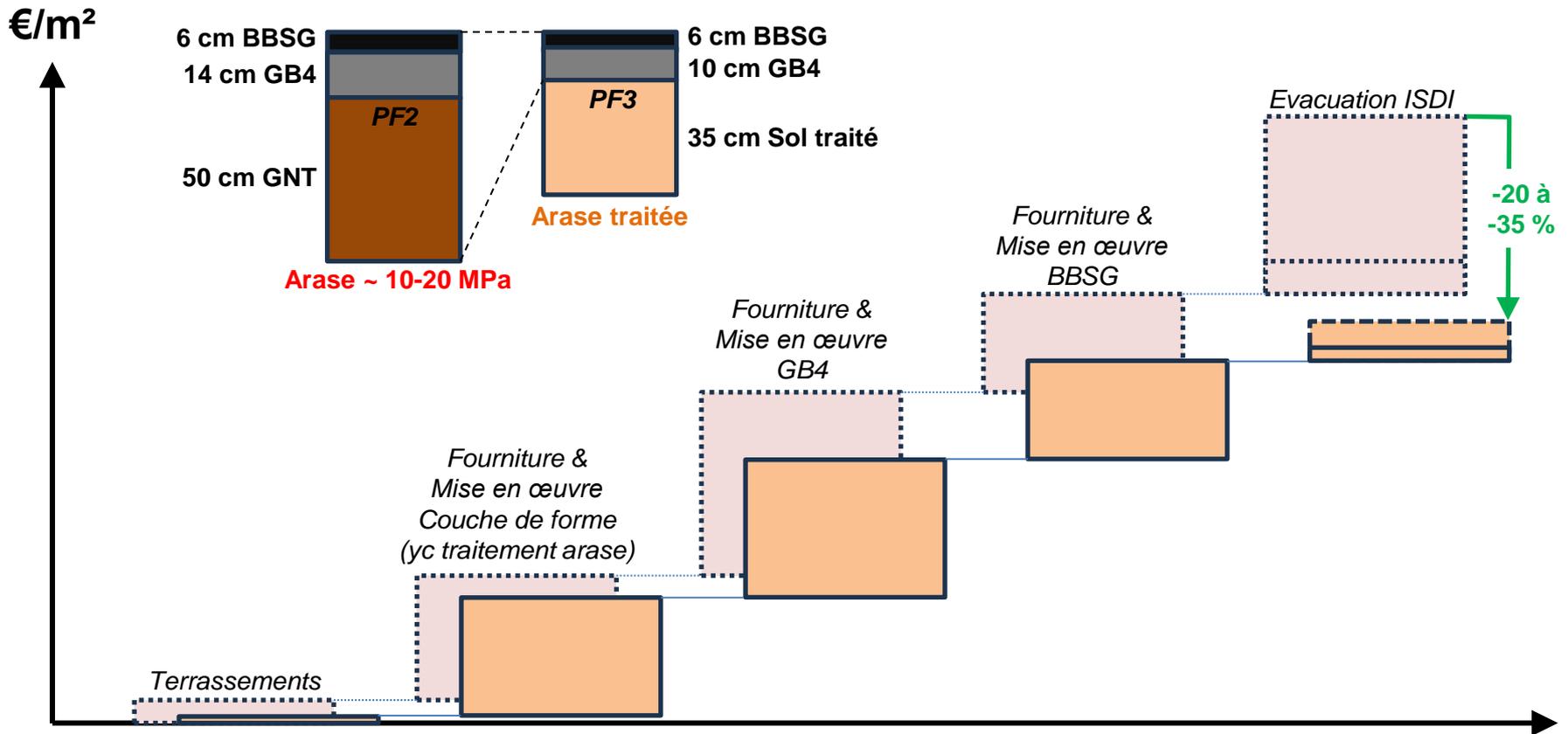
LA SOLUTION TRADITIONNELLE GRANULAIRE

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



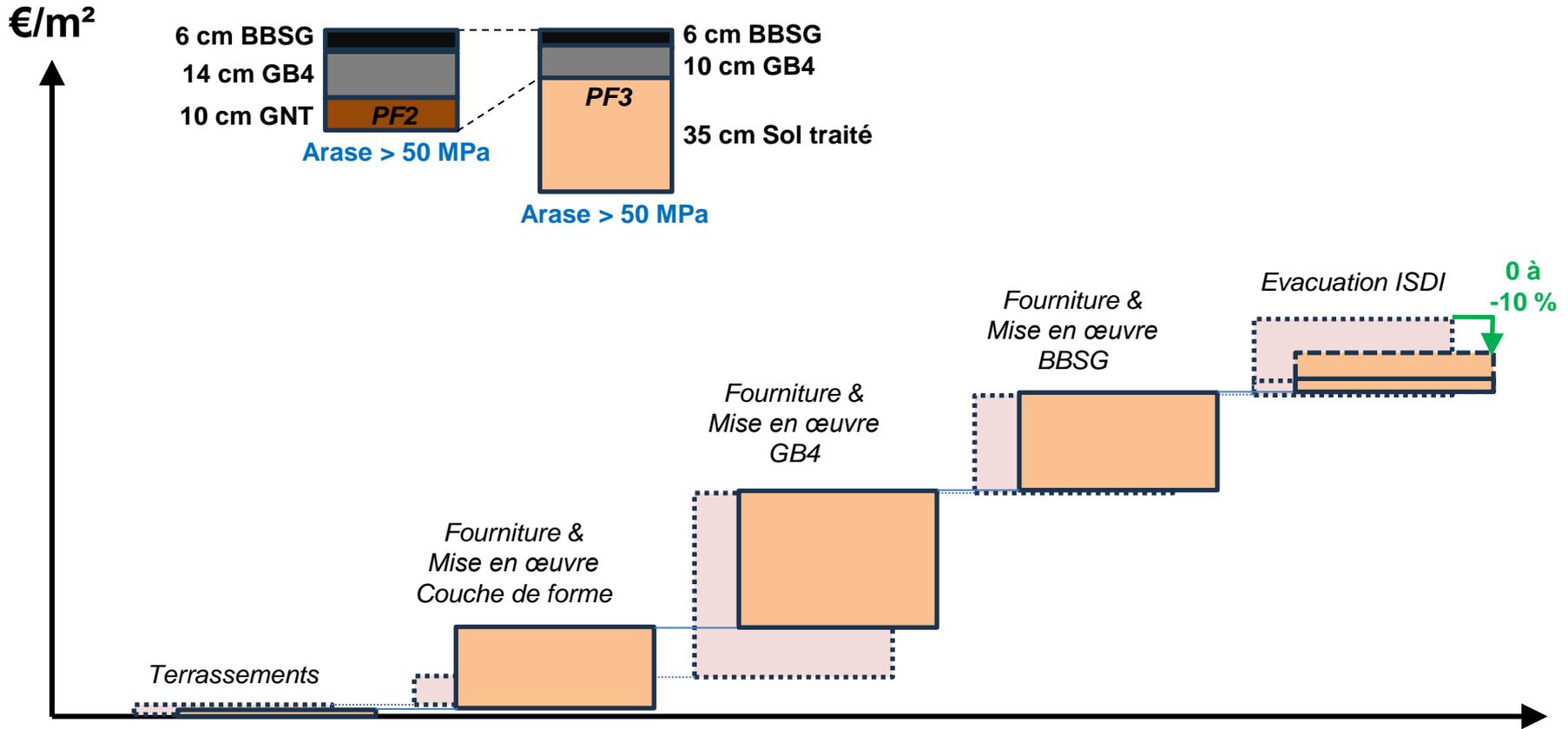
COMPARAISON GRANULAIRE/TRAITEMENT

Couche de forme traitée sur **arase traitée**



COMPARAISON GRANULAIRE/TRAITEMENT

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





ÉTAT DE L'ART





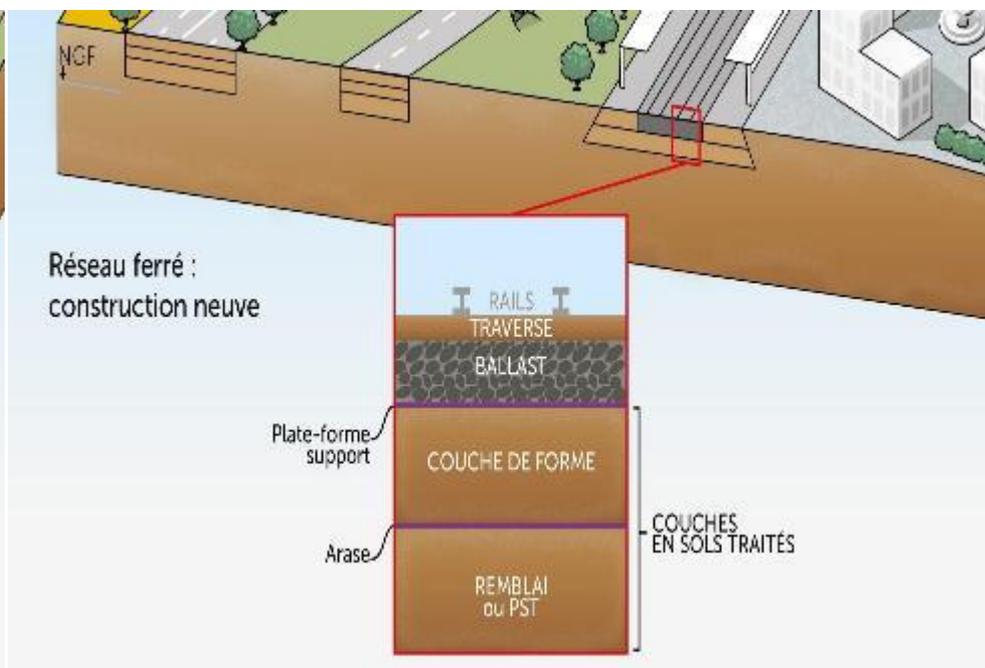
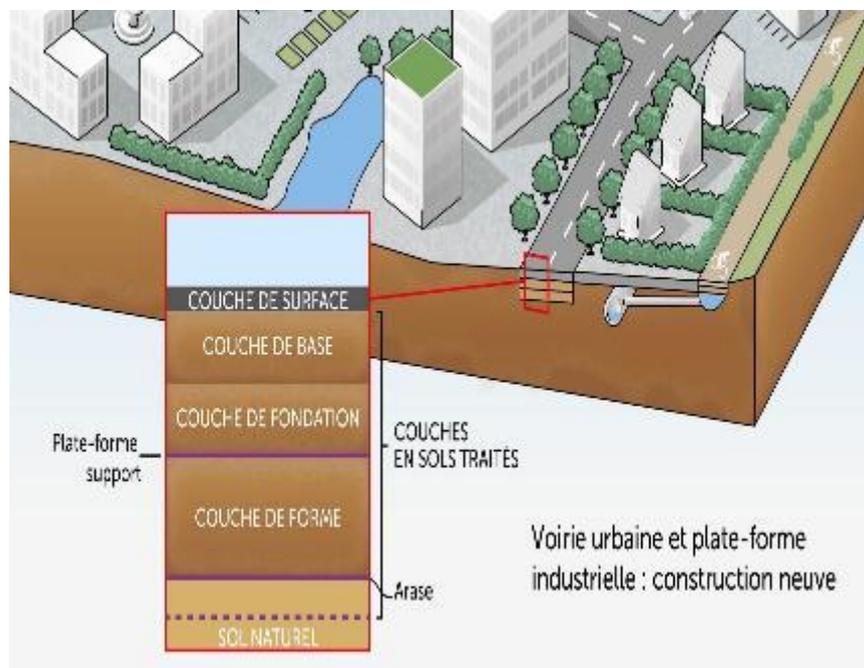
MARCHÉ DU TRAITEMENT DE SOLS

- ❑ **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.

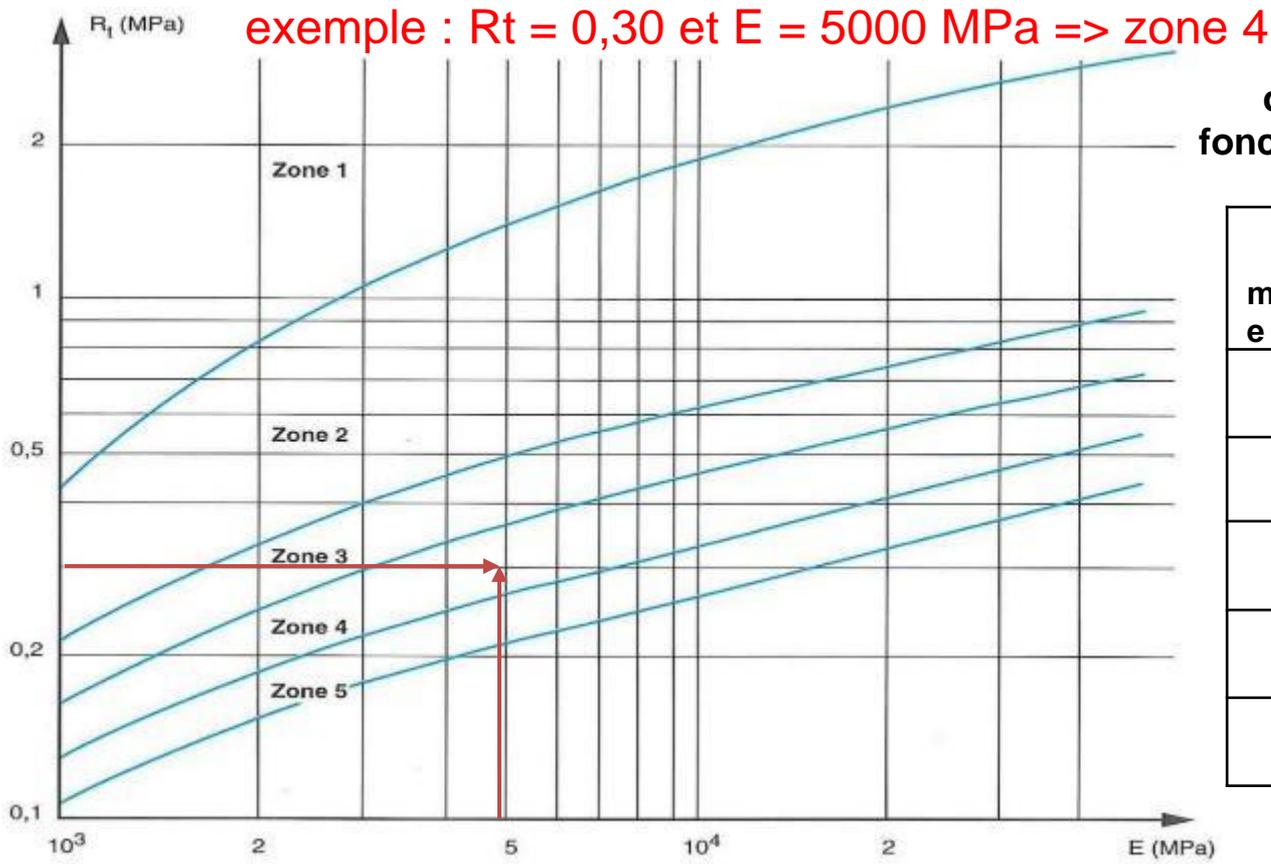


ÉTUDES DE FORMULATION

| Niveaux des Etudes | | Nature de l'ouvrage | |
|--------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Caractéristiques | | PST / AR - remblais techniques | Couche de Forme / Assises de Chaussées |
| Niveau 1 | Circulation possible | Rc >1 MPa (1,5 à 2 MPa pour des trafics lourds) | |
| | Mélange non gélif (si nécessaire) | Rit (RtB) > 0,25 MPa | |
| | Mélange insensible à l'eau | CBRim (4 j) > IPI | Rc-im (28+32) / Rc (à 60 j) : - soit > 0,8 si VBs < 0,5 - soit > 0,6 (ou 0.7 pour assises de chaussées) si VBs > 0,5 |
| | Caractéristiques mécaniques | Rit > 0.20 MPa (selon P 94-100 / caractérise l'obtention d'une « prise ») | Rt/E à 90 j : classe 4 minimum (traitement en place) (avec, pour assises de chaussées abatement 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



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 |

$$R_t = R_{it} \times 0.8$$

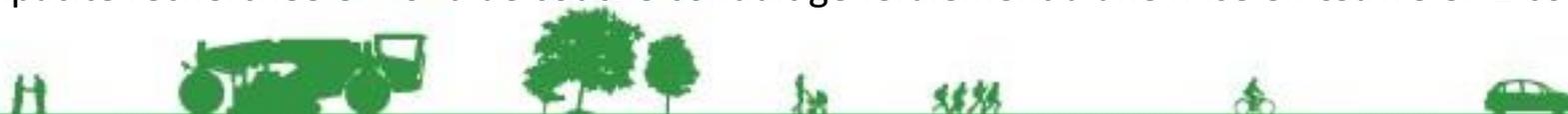
DIMENSIONNEMENT « COUCHE DE FORME » (2)

ÉPAISSEUR (cm)

selon classe d'arase et classe mécanique du sol traité

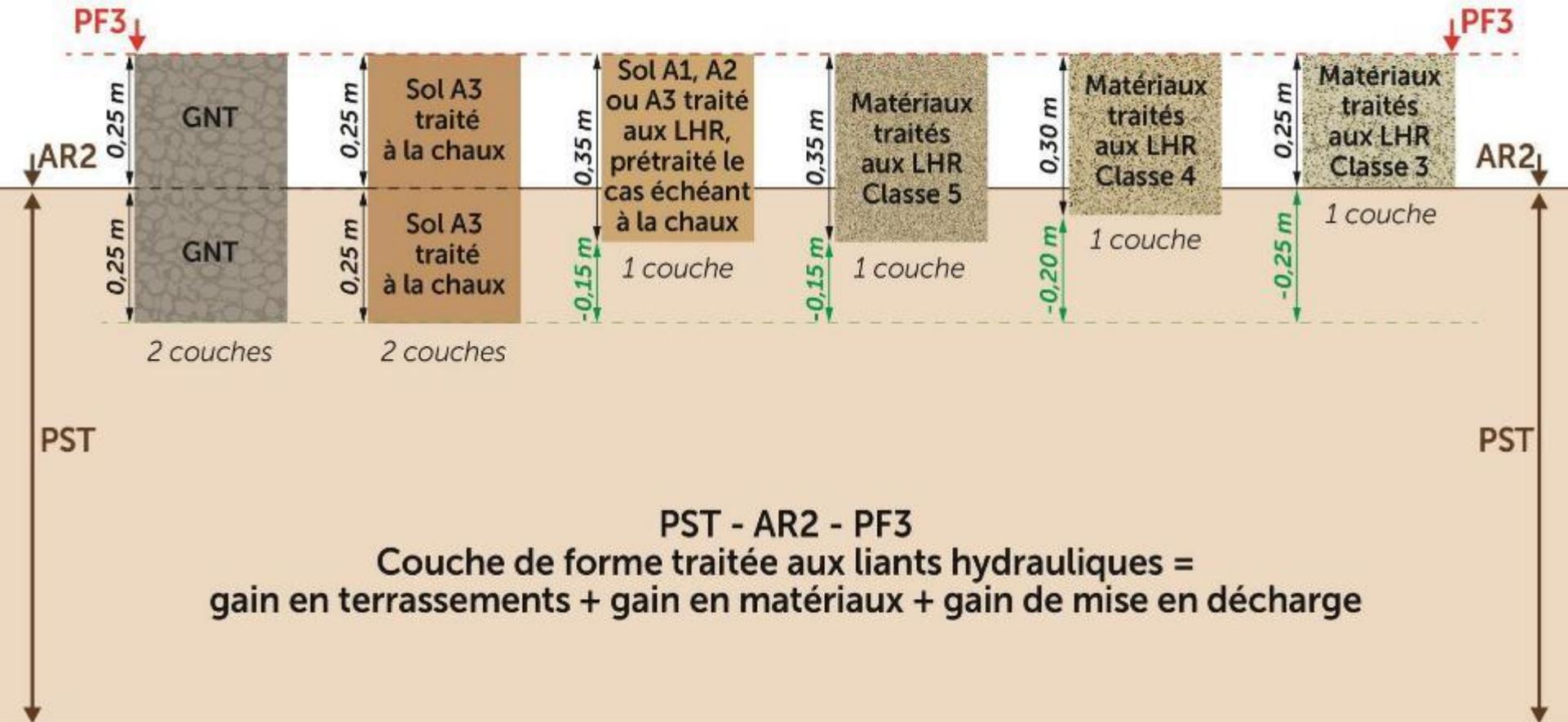
| Classe AR | | AR1 (EV2 > 35 MPa) | | | | AR2 (EV2 > 50 MPa) | | |
|--------------------|---|--------------------|-------|-----|-----|--------------------|-----|-----|
| Classe mécanique | 3 | | | 30 | 40* | | 25 | 30 |
| | 4 | 30 | 35 | 35 | 45* | 25 | 30 | 35 |
| | 5 | 35 | 45* | 50* | 55* | 30 | 35 | 45* |
| Classe Plate-forme | | PF2 | PF2qs | PF3 | PF4 | PF2qs | PF3 | PF4 |

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



DIMENSIONNEMENT "COUCHE DE FORME" (3)

PF3 sur AR2



PST - AR2 - PF3
Couche de forme traitée aux liants hydrauliques =
gain en terrassements + gain en matériaux + gain de mise en décharge

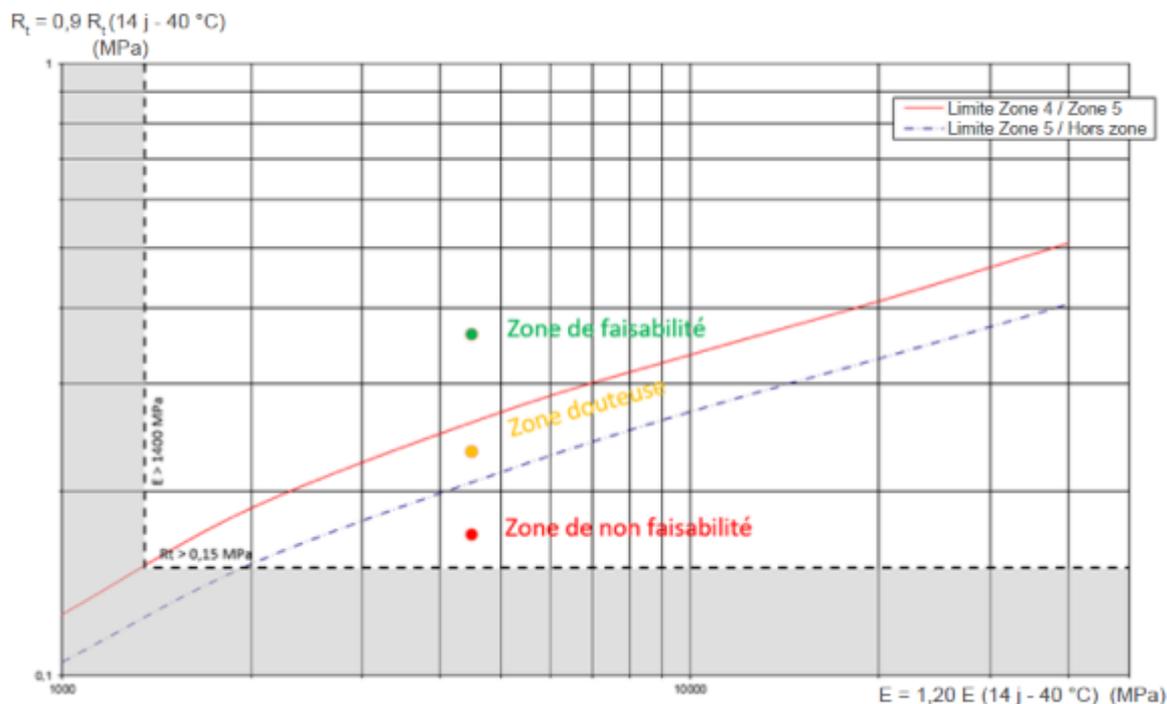
DIMENSIONNEMENT DE COUCHE DE FORME

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 Cv (moyenne / écart type).



QUANTITE A EPANDRE :

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

MALAXAGE

□ OBJECTIFS :

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

□ EPAISSEURS TRAITÉES (LH)

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

□ MOYENS MATERIELS



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





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

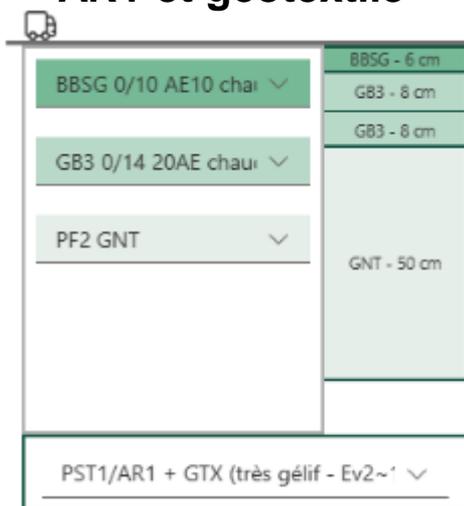


ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE

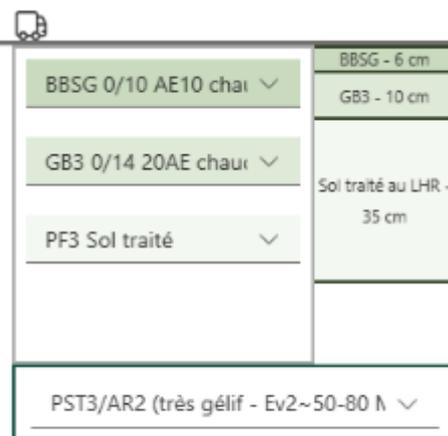


IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU TRAITEMENT

PF2 granulaire sur AR1 et géotextile



PF3 traitée sur AR2 naturelle



PF3 traitée sur AR2 traitée



Résultats calculs

| | Non gélif | Non gélif | Non gélif |
|-----------------------------------------------|---------------|------------------------|------------------------|
| Vérif. gel/dégel | | | |
| Coût (k€/1000 m ²) | ● 53 à 66 | ● 31 à 39 (-30 à -50%) | ● 34 à 42 (-30 à -50%) |
| Co2 (t eq CO2/1000 m ²) | ● 33 à 41 | ● 31 à 39 (-5 à -15%) | ● 39 à 49 (+15 à +30%) |
| Ressources (T granulats/1000 m ²) | ● 1270 à 1554 | ● 272 à 334 (< -75%) | ● 272 à 334 (< -75%) |
| Trafic PL Chantier (PL/1000 m ²) | ● 101 à 125 | ● 24 à 30 (< -75%) | ● 24 à 30 (< -75%) |
| Déchets générés (T/1000 m ²) | ● 1166 à 1426 | ● 259 à 317 (< -75%) | ● 259 à 317 (< -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)



Épaisseurs 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)

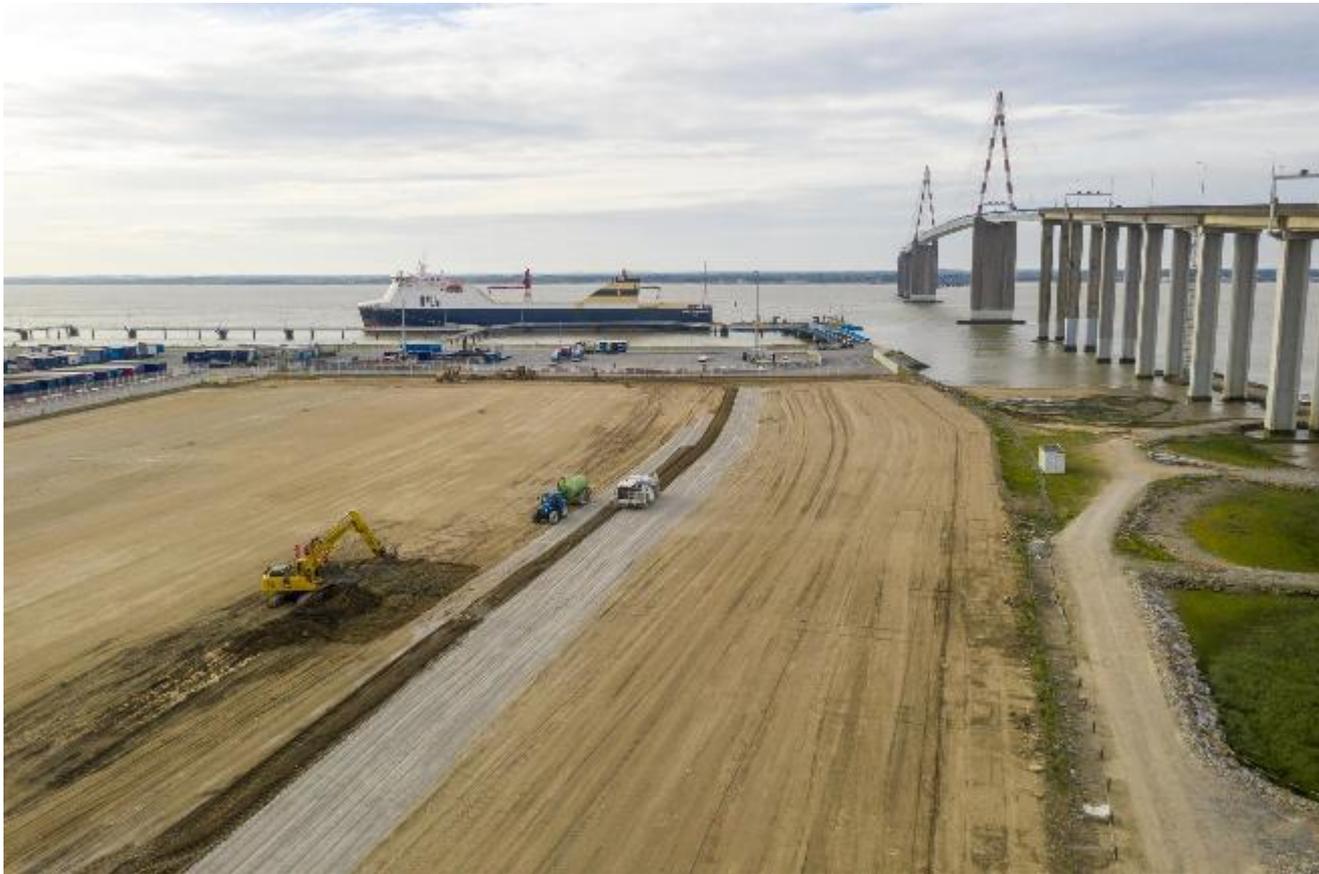
Arase ~ 10-20 MPa



UNE PLATE-FORME INDUSTRIELLE SANS GRAVE BITUME



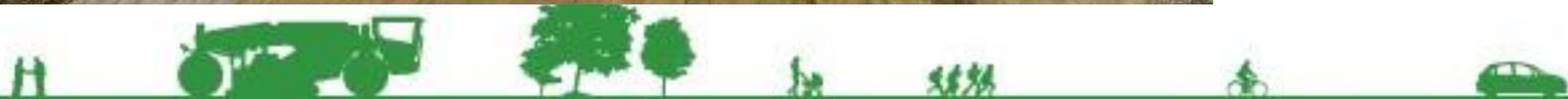
UNE PLATE-FORME PORTUAIRE RO-RO DÉCONTAMINÉE



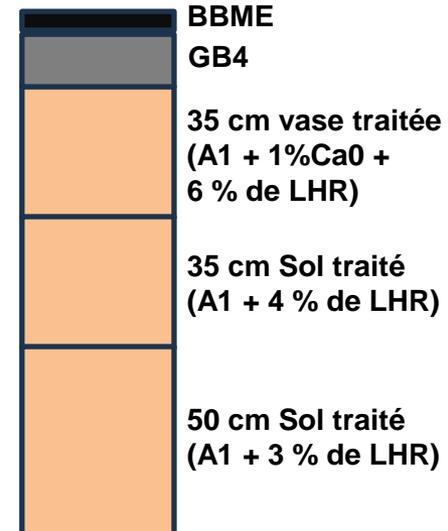
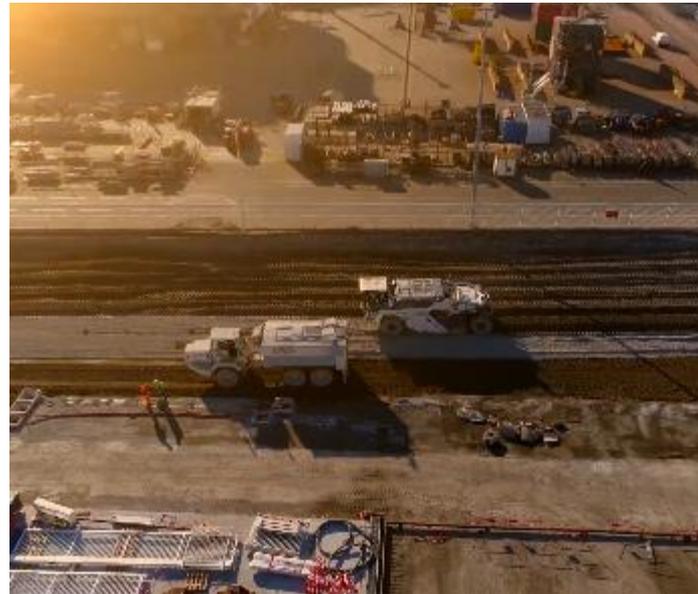
5 cm BBSG

35 cm Sol traité
(A1 + 6 % de LHR)

Arase ~ 20-30 MPa



UNE PLATE-FORME DE CHANTIER NAVAL EN VASES TRAITÉES



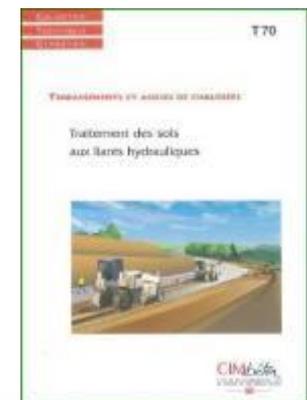
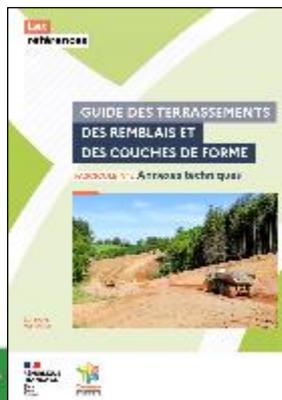
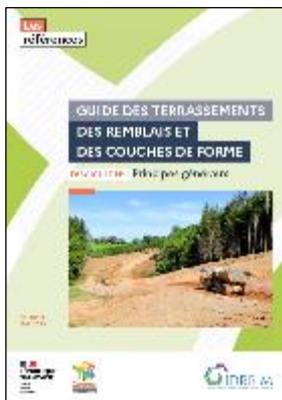


BIBLIOGRAPHIE



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.*



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

