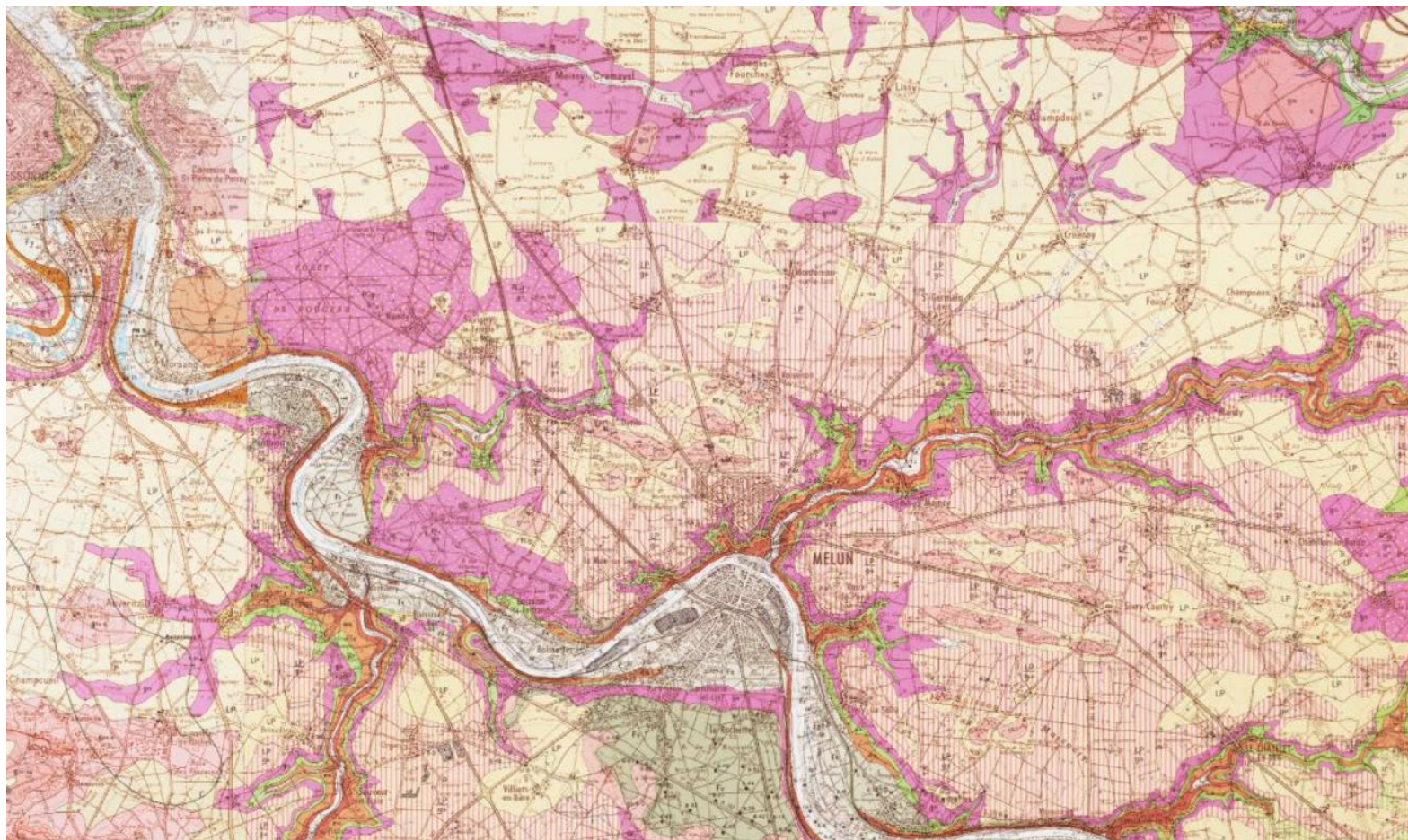


# TRAITEMENT DES SOLS EN PLACE AUX LIANTS HYDRAULIQUES

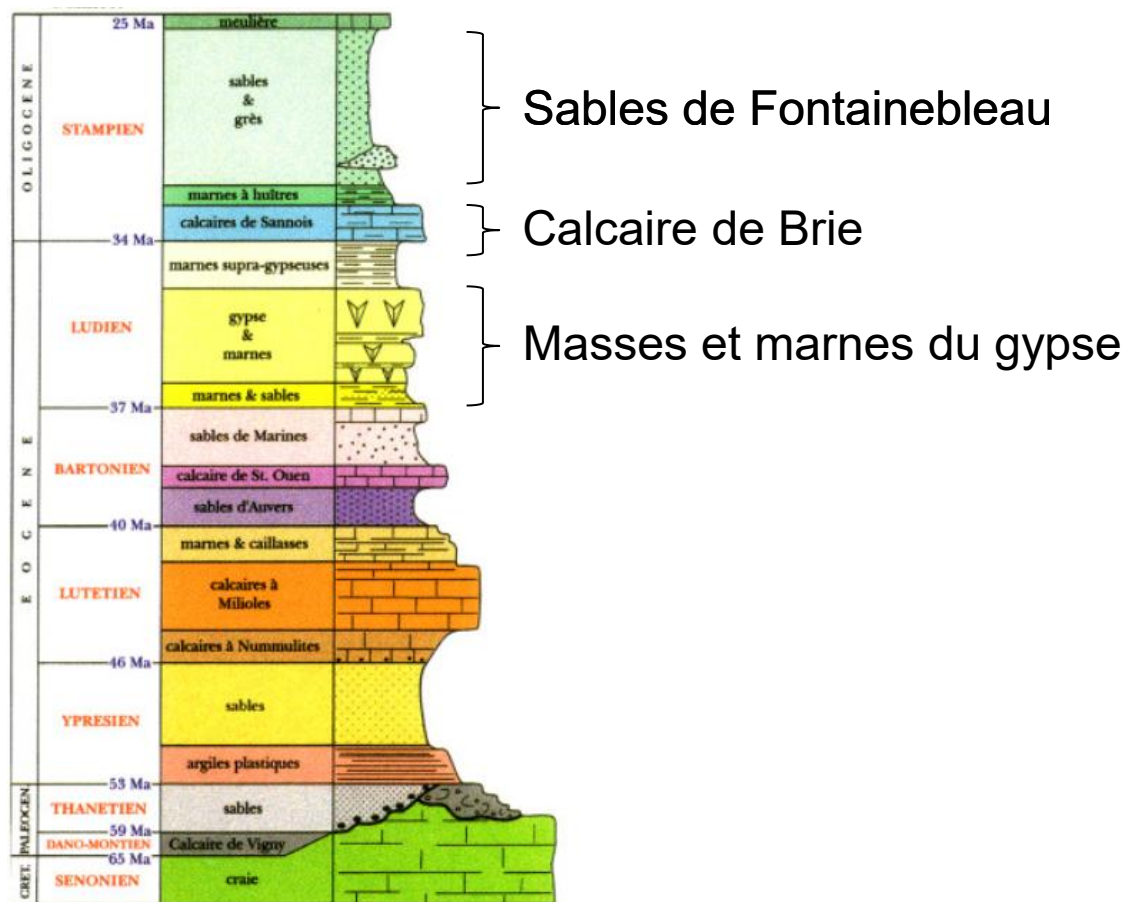
Valéry FERBER



# REGARD SUR LA GÉOLOGIE LOCALE



# REGARD SUR LA GÉOLOGIE FRANCILIENNE





# APPROCHE ÉCONOMIQUE

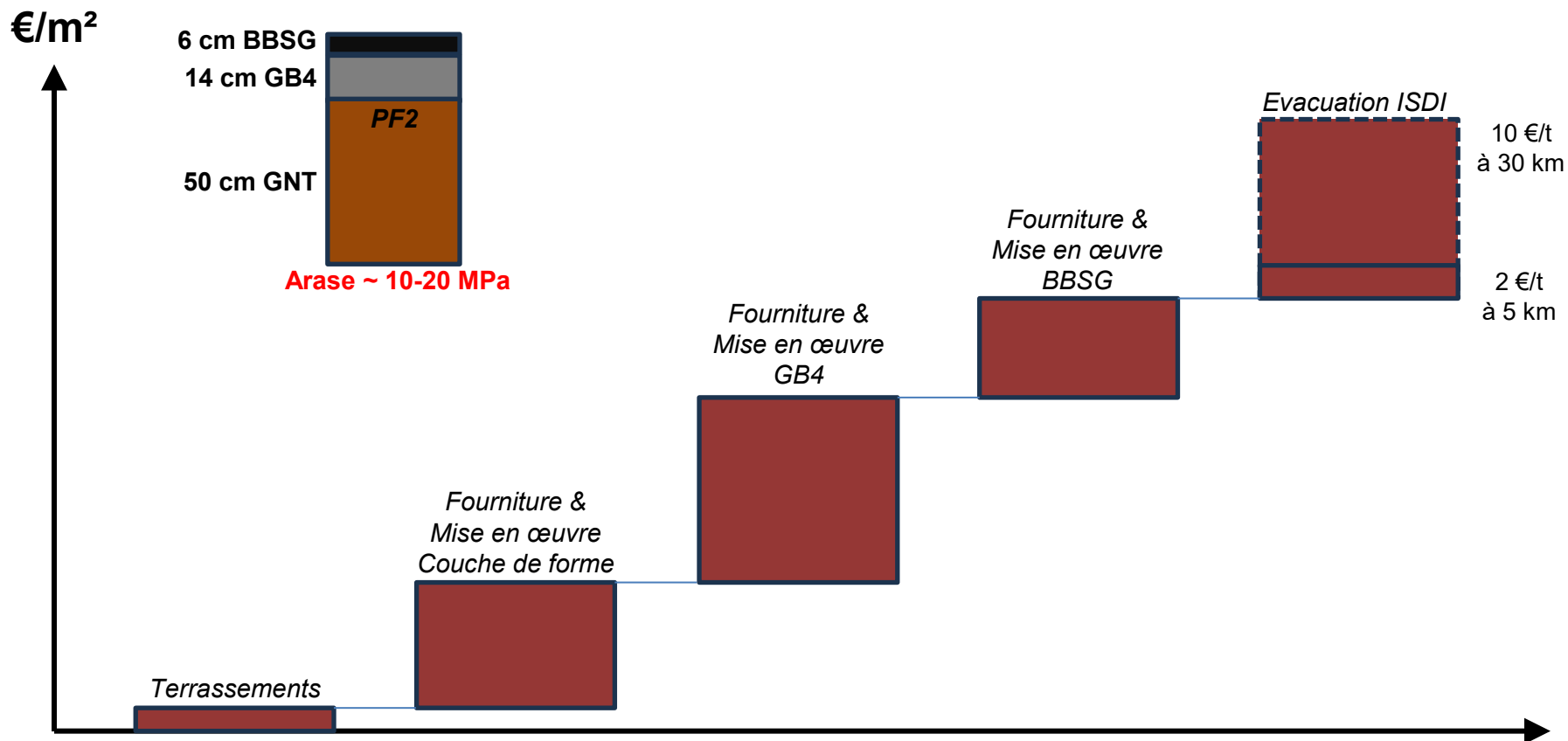






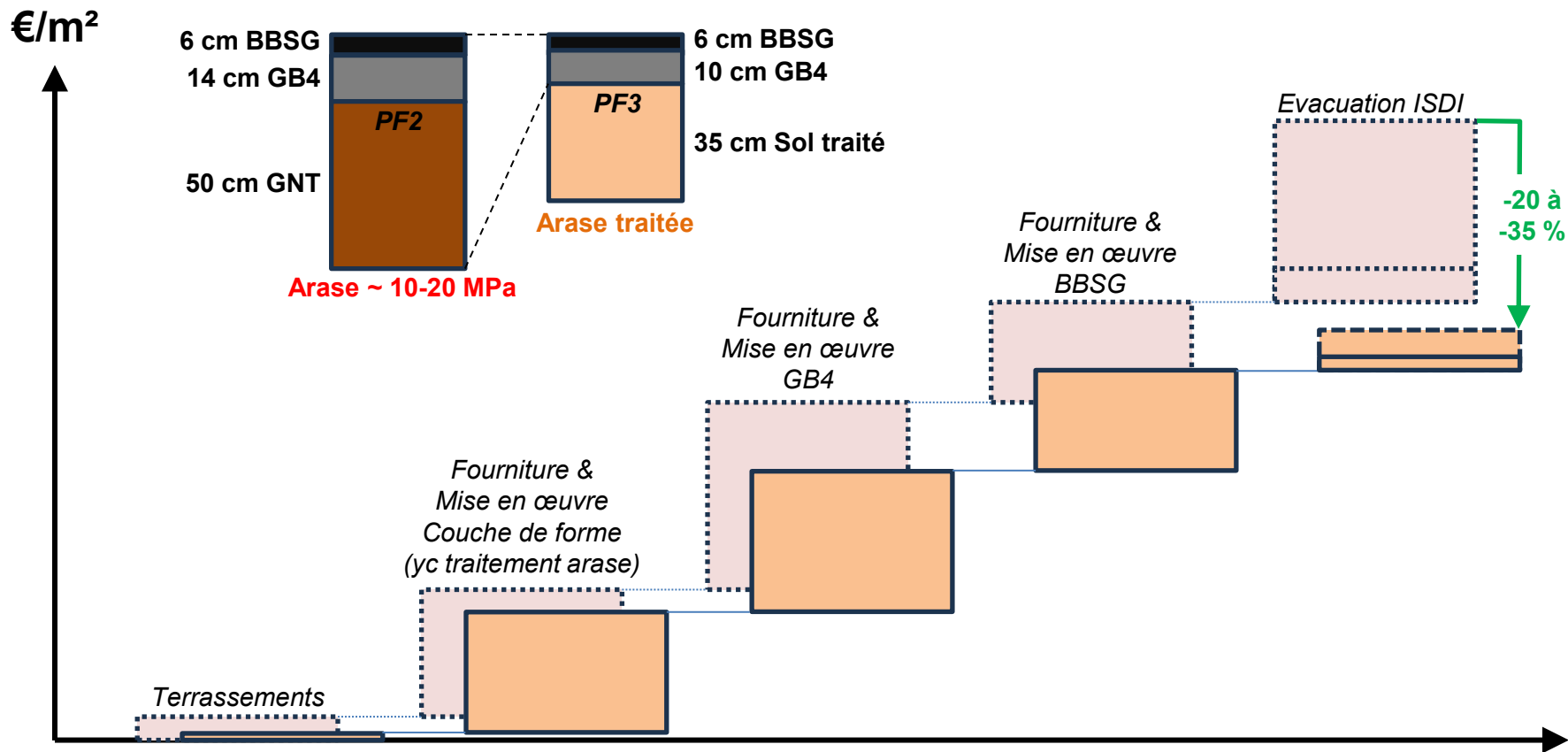
# LA SOLUTION TRADITIONNELLE GRANULAIRE

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



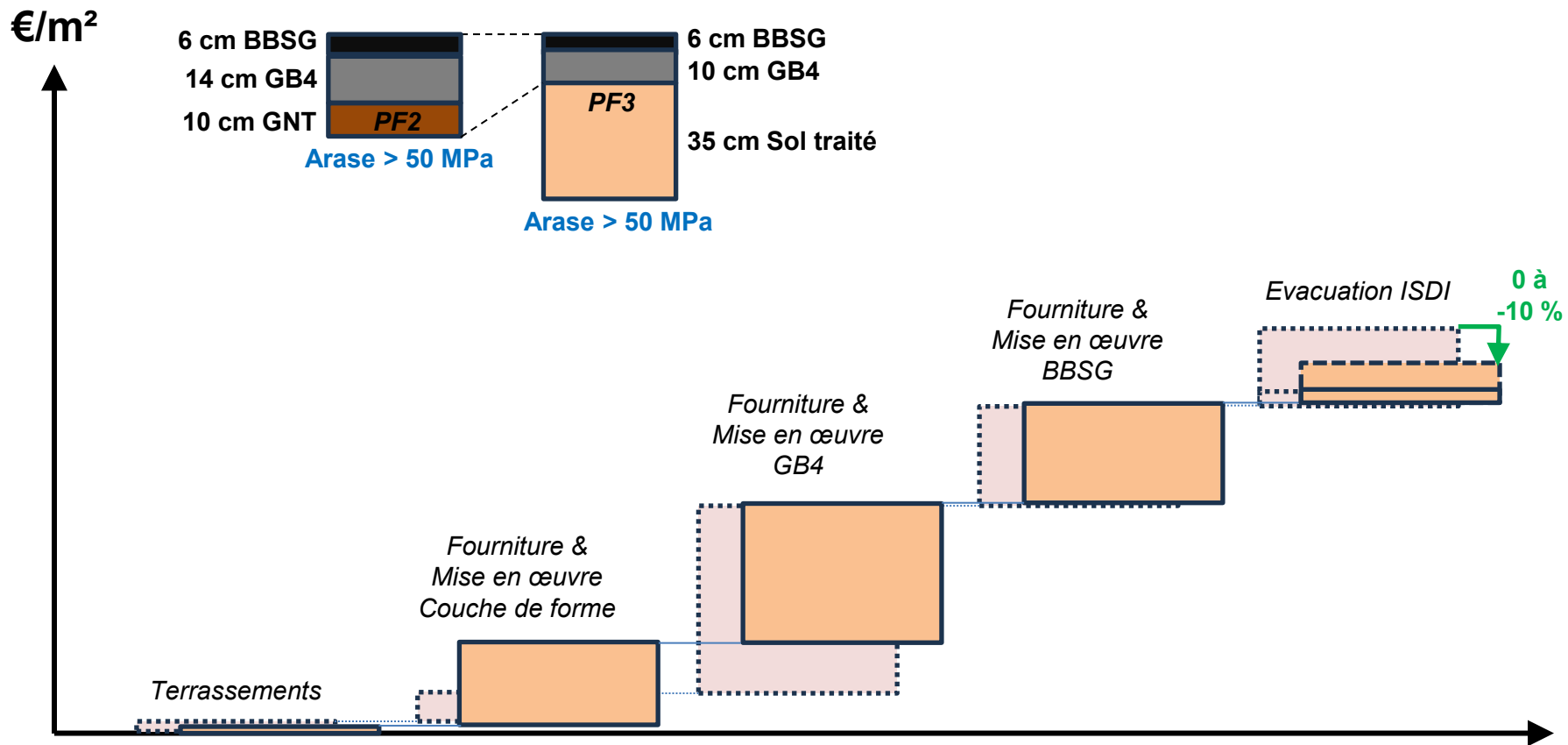
# COMPARAISON GRANULAIRE/TRAITEMENT

## Couche de forme traitée sur **arase traitée**



# COMPARAISON GRANULAIRE/TRAITEMENT

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





# ÉTAT DE L'ART







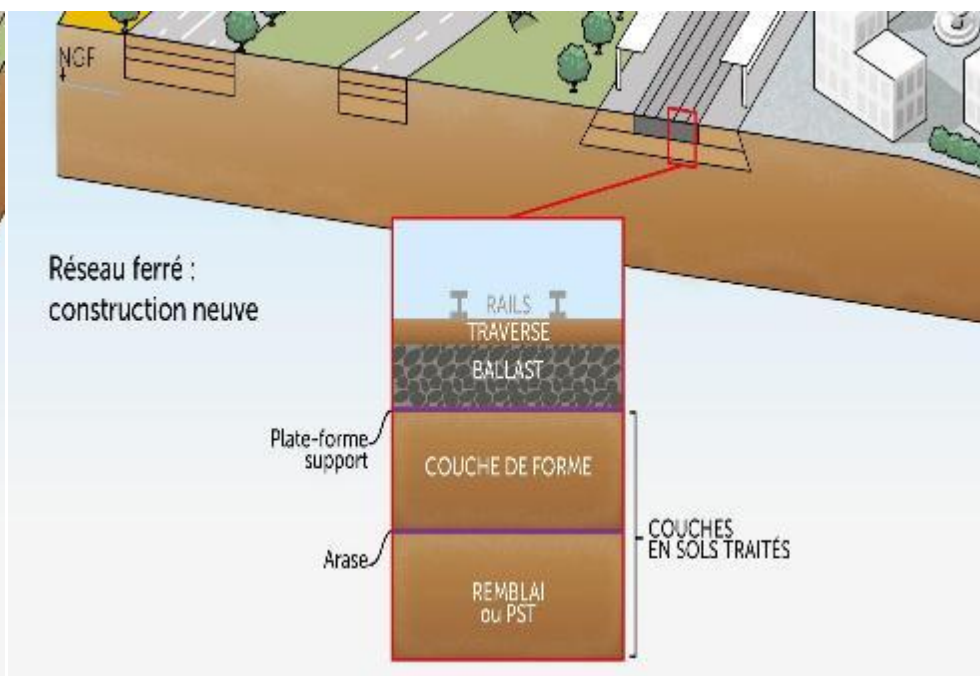
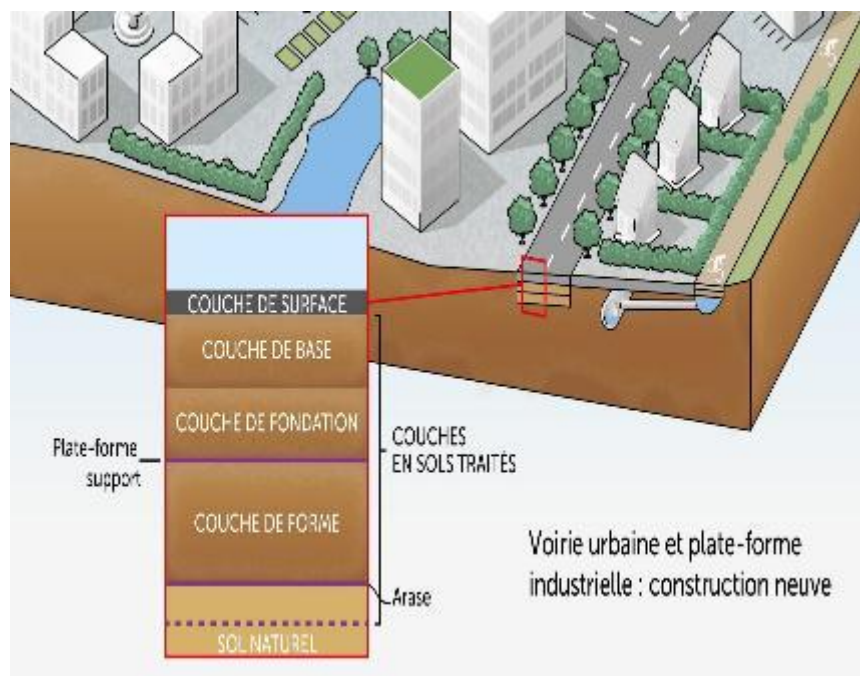
# MARCHÉ DU TRAITEMENT DE SOLS

- ❑ **SURFACES IMPORTANTES** : 10 à 15 millions de m<sup>2</sup> / 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.



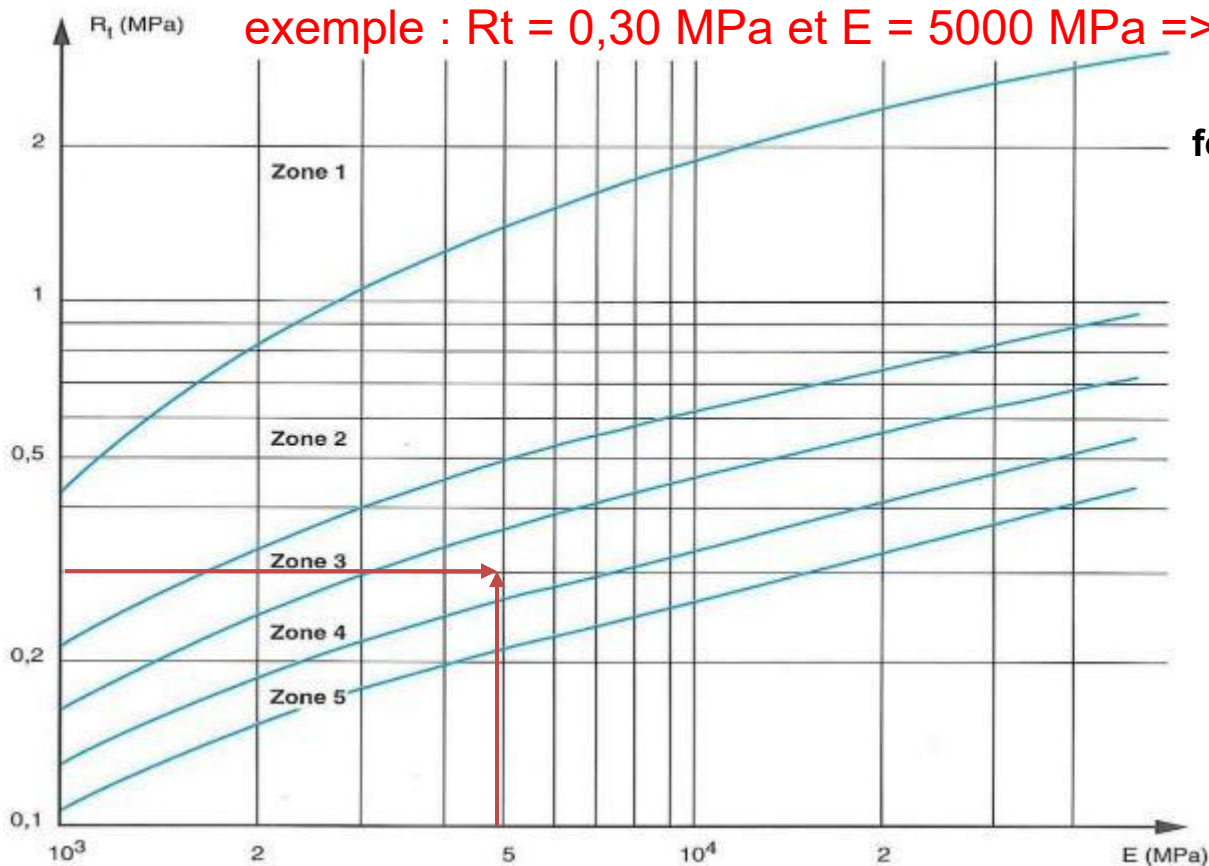


# ÉTUDES DE FORMULATION

| Niveaux des Etudes |                                   | Nature de l'ouvrage                                                                    |                                                                                                                                                                      |
|--------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Caractéristiques   |                                   | PST / AR -<br>remblais<br>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        | $CBR_{im} (4 \text{ j}) > IPI$                                                         | $R_{c-im} (28+32) / R_c (\text{à } 60 \text{ j}) :$<br>- soit $> 0,8$ si $VBs < 0,5$<br>- 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 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 « $R_t / E$ » - 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 <sup>(1)</sup> |        | 25  | 30                |
|                      | 4 | 30     | 35                | 35                | 45 <sup>(1)</sup> | 25     | 30  | 35                |
|                      | 5 | 35     | 45 <sup>(1)</sup> | 50 <sup>(1)</sup> | 55 <sup>(1)</sup> | 30     | 35  | 45 <sup>(1)</sup> |
| 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



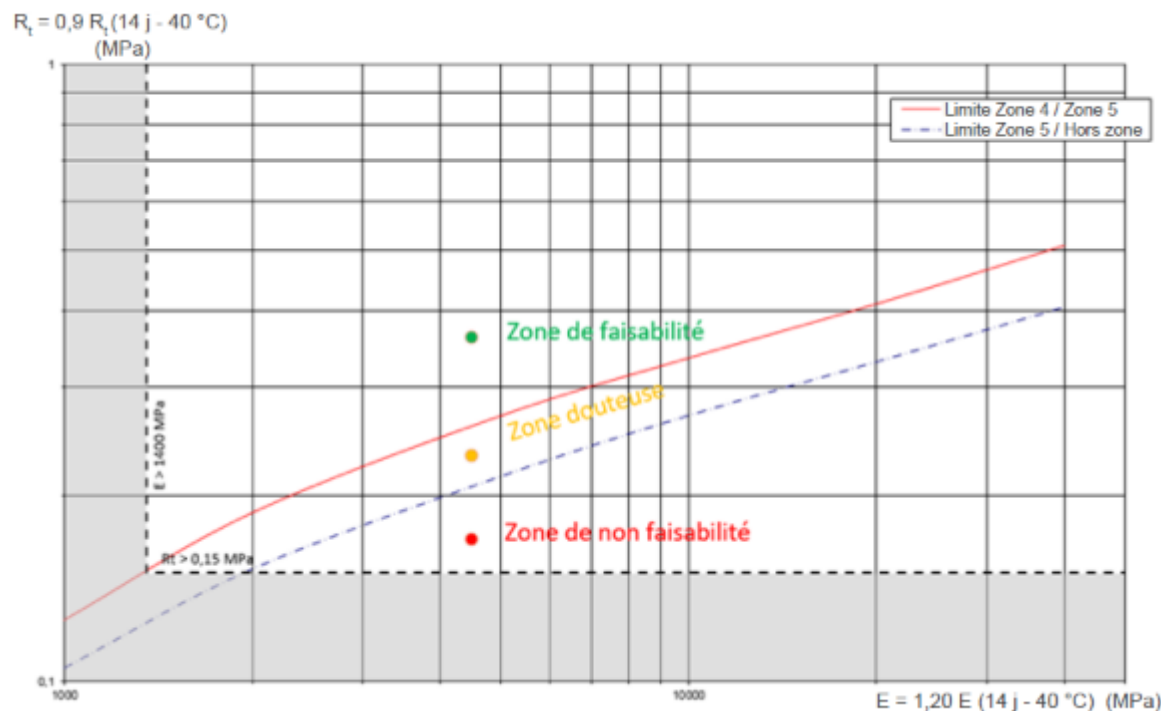
# DIMENSIONNEMENT DE COUCHE DE FORME

## 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 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 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





# 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

## PF2 granulaire sur AR2 traitée

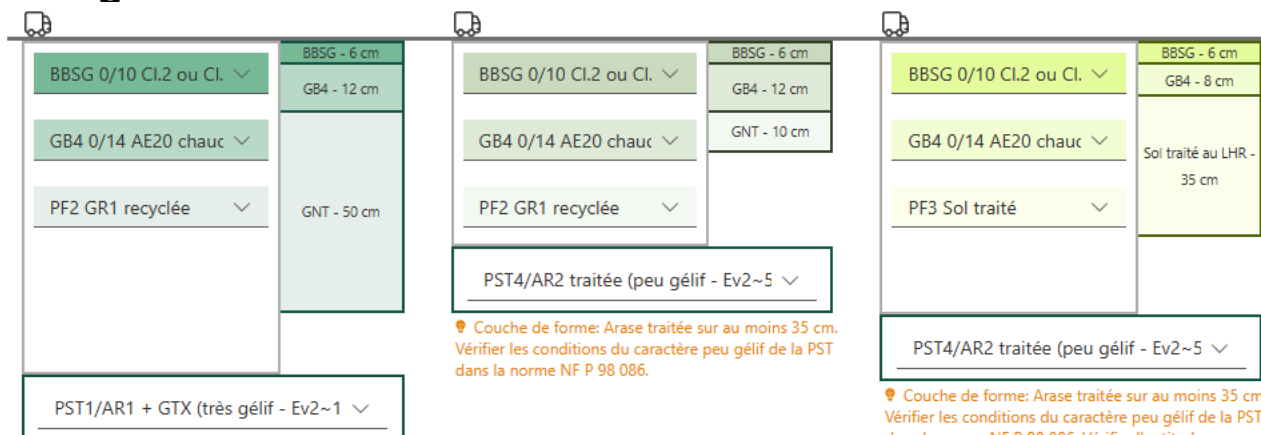
## PF3 traitée sur AR2 traitée

☰ Couche de roulement ⓘ

☰ Couche d'assise ⓘ

☰ Couche de forme ⓘ

☰ Partie supérieure des Terrassements Arase ⓘ



🔦 Couche de forme: Géotextile posé sur l'arase.

🔦 Couche de forme: Arase traitée sur au moins 35 cm. Vérifier les conditions du caractère peu gélif de la PST dans la norme NF P 98 086.

🔦 Couche de forme: Arase traitée sur au moins 35 cm. Vérifier les conditions du caractère peu gélif de la PST dans la norme NF P 98 086. Vérifier l'aptitude au traitement des sols (NF P 94 100) et l'obtention d'une classe mécanique 5 au moins (Guide de traitement des sols).

|                                                                                                                           |               |                                                                                                                   |                                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  Coût<br>(k€/1000 m²) ⓘ                  | ● 72 à 90     | ● 47 à 59 (-30 à -50%)<br>     | ● 40 à 50 (-30 à -50%)<br>     |
|  Co2<br>(t eq CO2/1000 m²) ⓘ           | ● 32 à 40     | ● 36 à 46 (+5 à +15%)<br>    | ● 45 à 56 (+30 à +50%)<br>   |
|  Ressources<br>(T granulats/1000 m²) ⓘ | ● 320 à 392   | ● 320 à 392 (0%)<br>         | ● 254 à 312 (-15 à -30%)<br> |
|  Trafic PL Chantier<br>(PL/1000 m²) ⓘ  | ● 95 à 117    | ● 40 à 50 (-50 à -75%)<br>   | ● 21 à 26 (< -75%)<br>       |
|  Déchets générés<br>(T/1000 m²) ⓘ      | ● 1101 à 1347 | ● 453 à 555 (-50 à -75%)<br> | ● 226 à 278 (< -75%)<br>     |

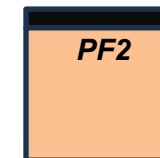


# QUELQUES CAS D'APPLICATION





# UN STATIONNEMENT VL DE 3000 m<sup>2</sup>

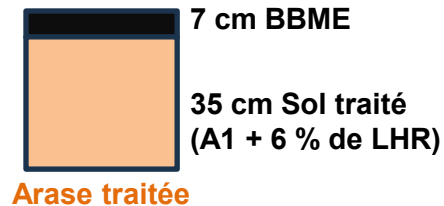


5 cm BBSG

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<br>(A1 + 1%CaO +<br>6 % de LHR) |
|  | 35 cm Sol traité<br>(A1 + 4 % de LHR)              |
|  | 50 cm Sol traité<br>(A1 + 3 % de LHR)              |

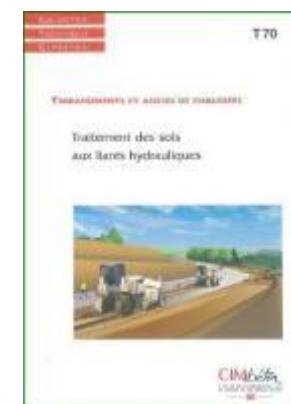


# BIBLIOGRAPHIE



# 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*

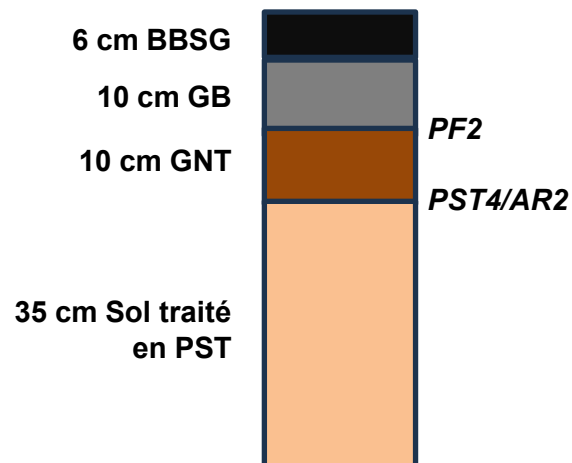


- *Matériel léger*



# 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

