TRAITEMENT DES SOLS EN PLACE AUX LIANTS HYDRAULIQUES

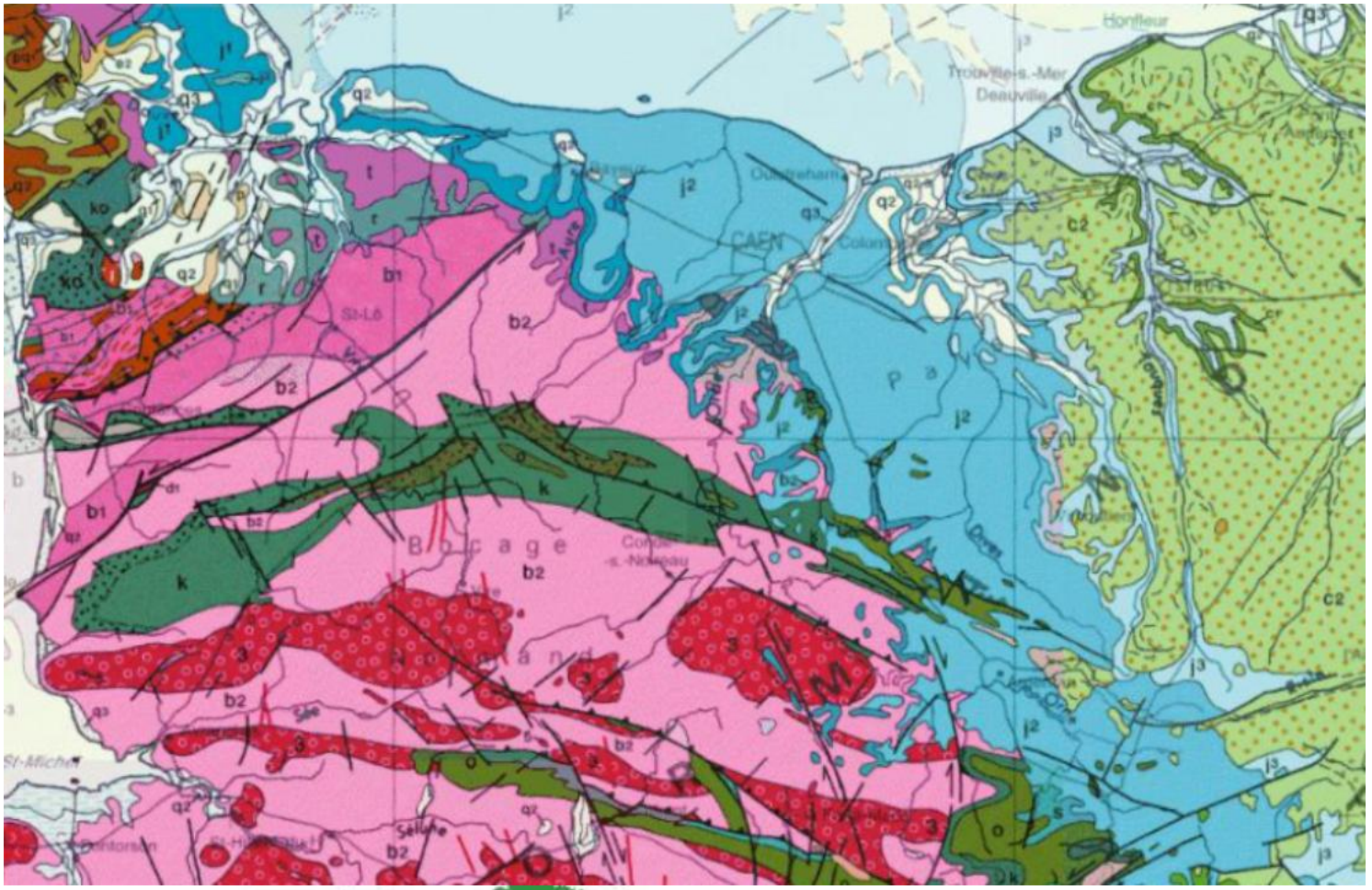
Valéry FERBER

talnia

CIMbéton
CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

TERRASSIERS de France

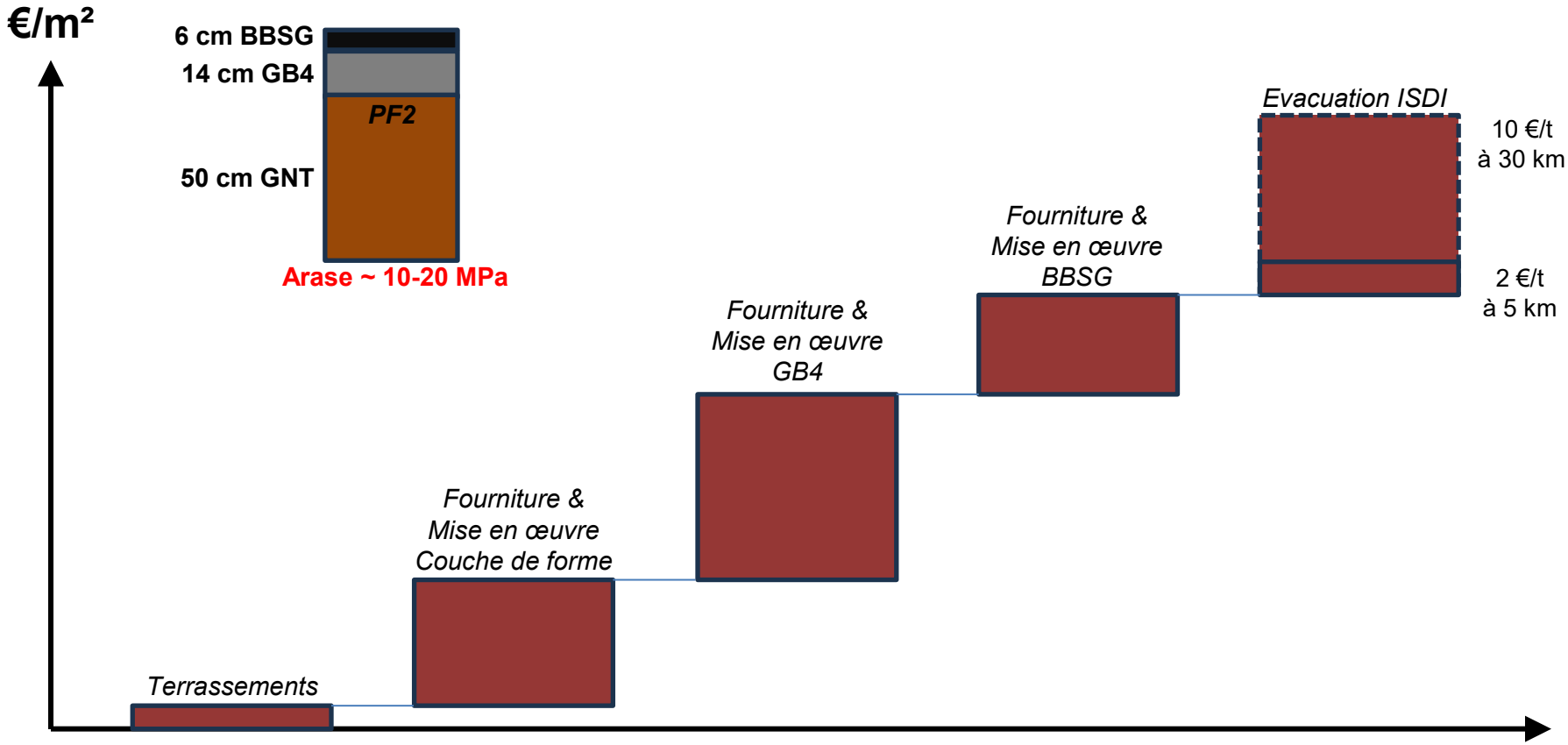
REGARD SUR LA GÉOLOGIE LOCALE



APPROCHE ÉCONOMIQUE

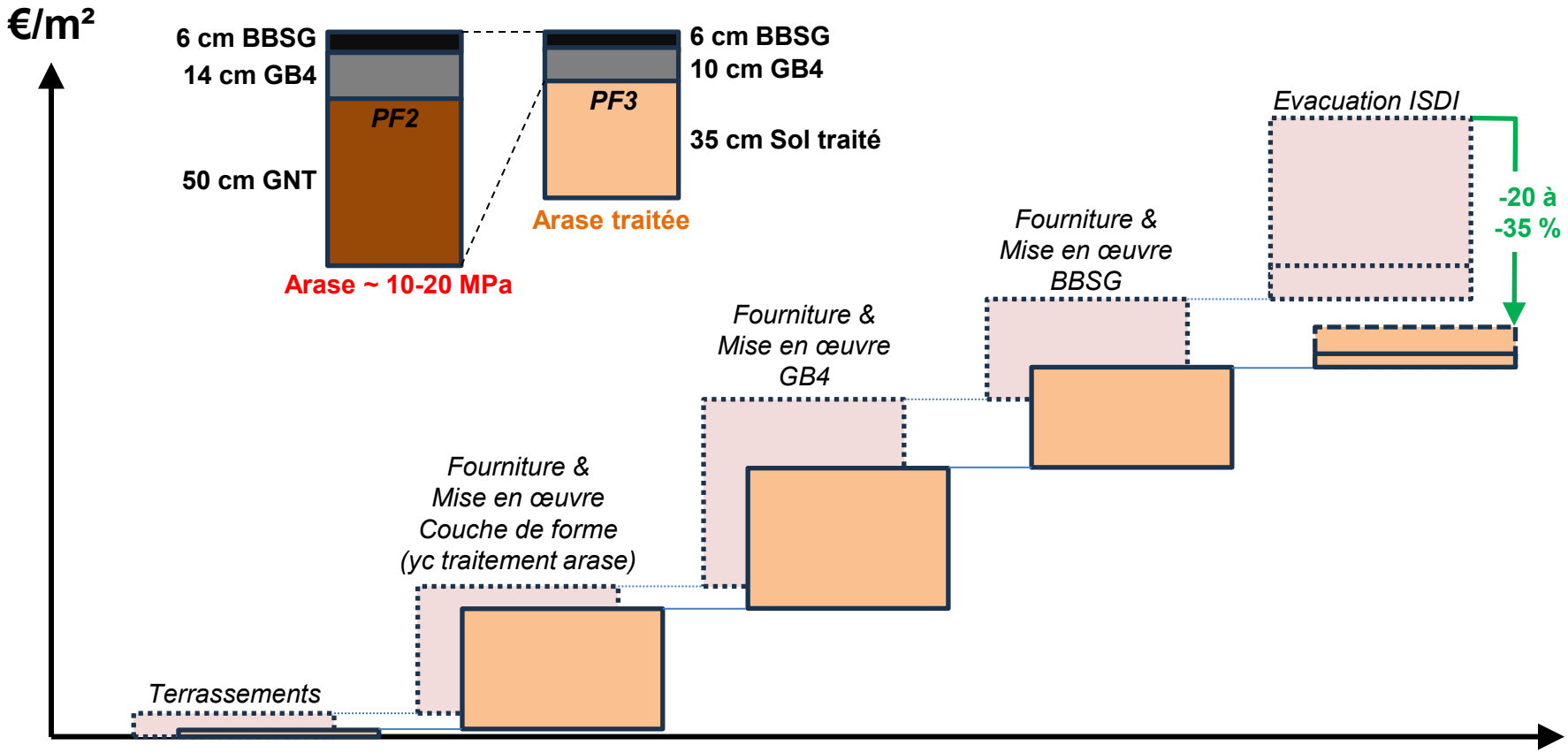
LA SOLUTION TRADITIONNELLE GRANULAIRE

Couche de forme GNT sur arase PEU portante



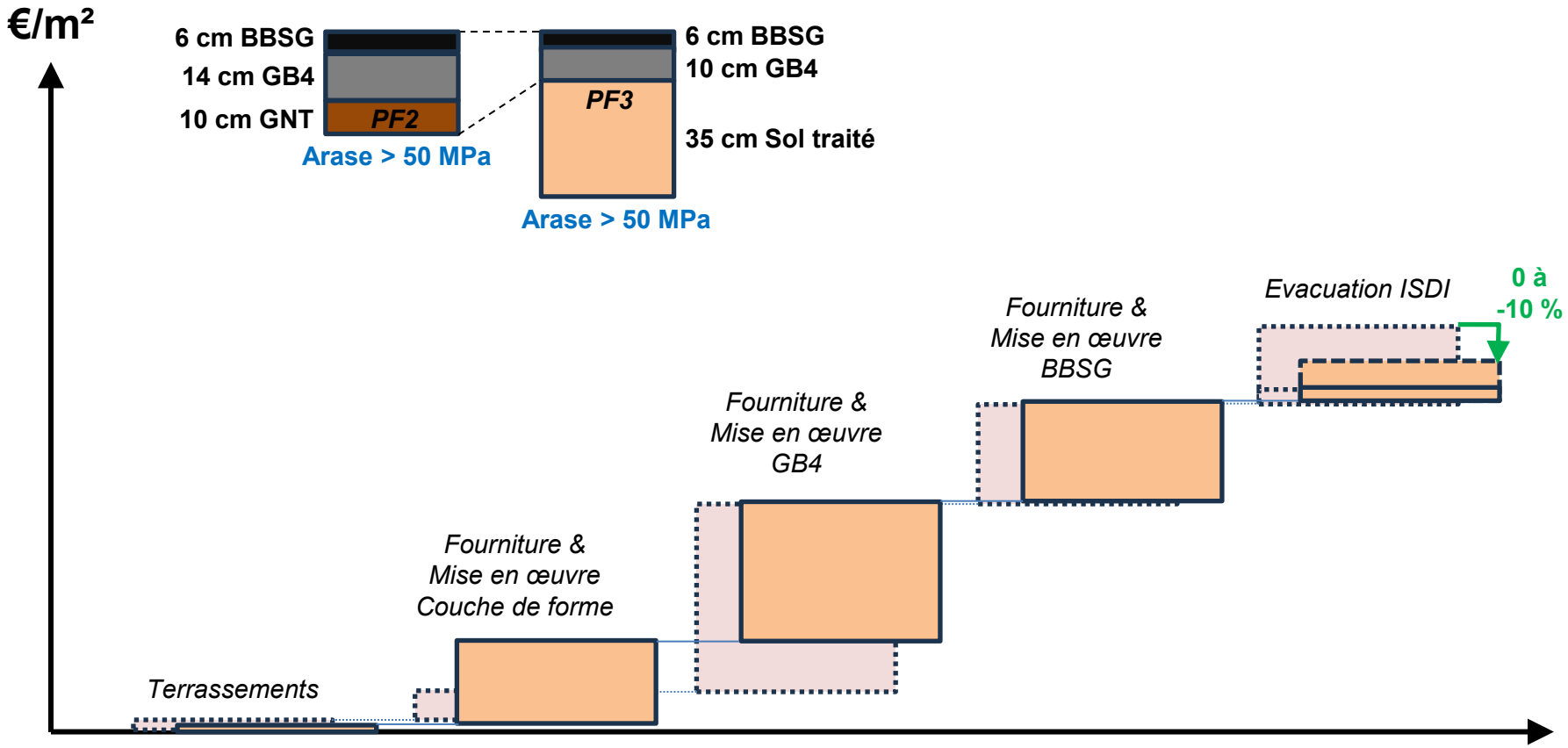
COMPARAISON GRANULAIRE/TRAITEMENT

Couche de forme traitée sur arase traitée



COMPARAISON GRANULAIRE/TRAITEMENT

Couche de forme GNT sur arase naturelle portante



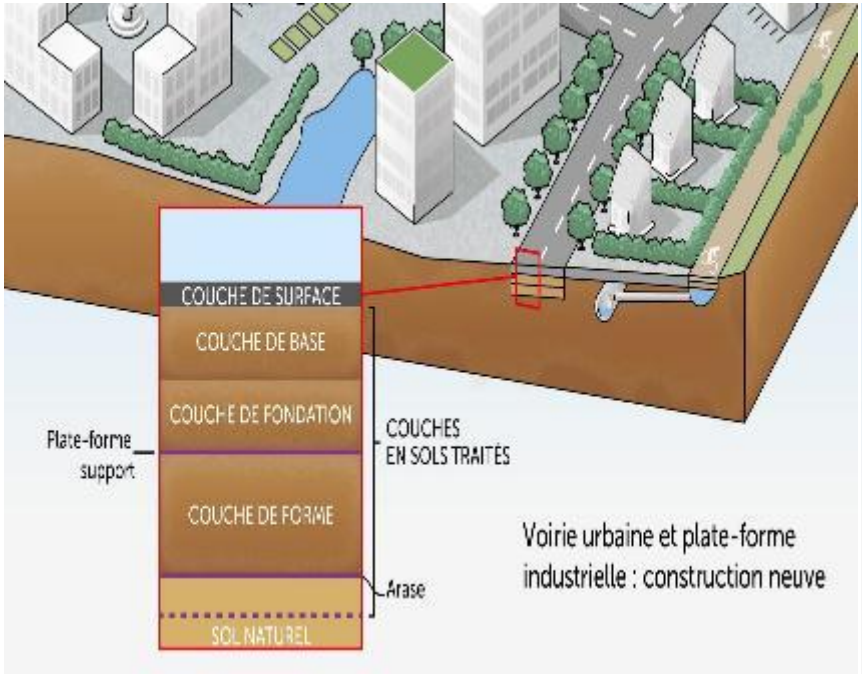
ÉTAT DE L'ART

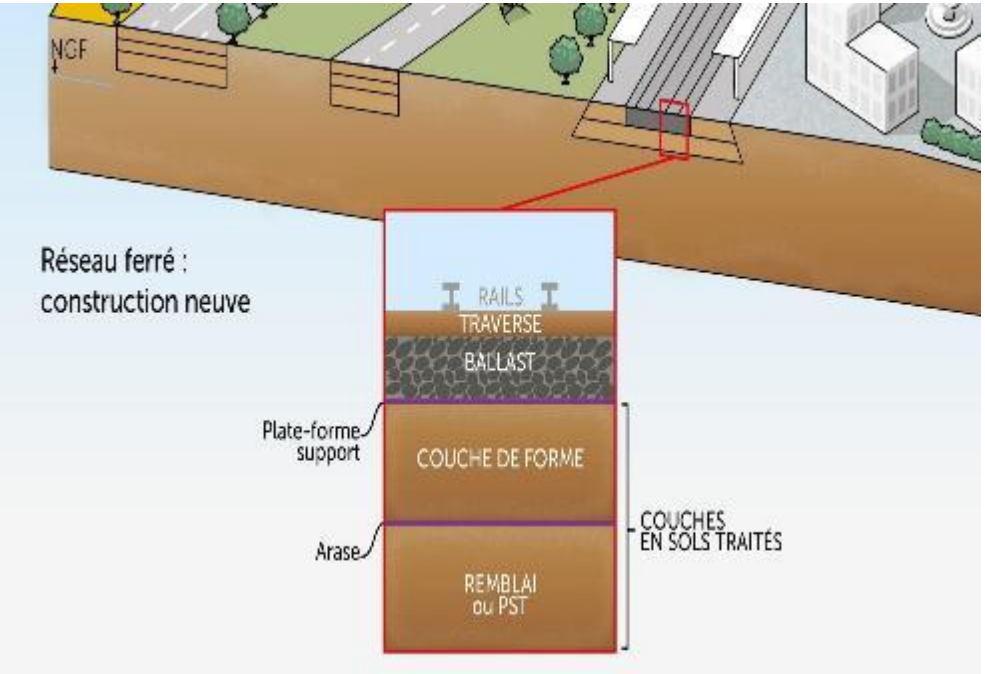
MARCHÉ DU TRAITEMENT DE SOLS

- **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

CIMbéton

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.

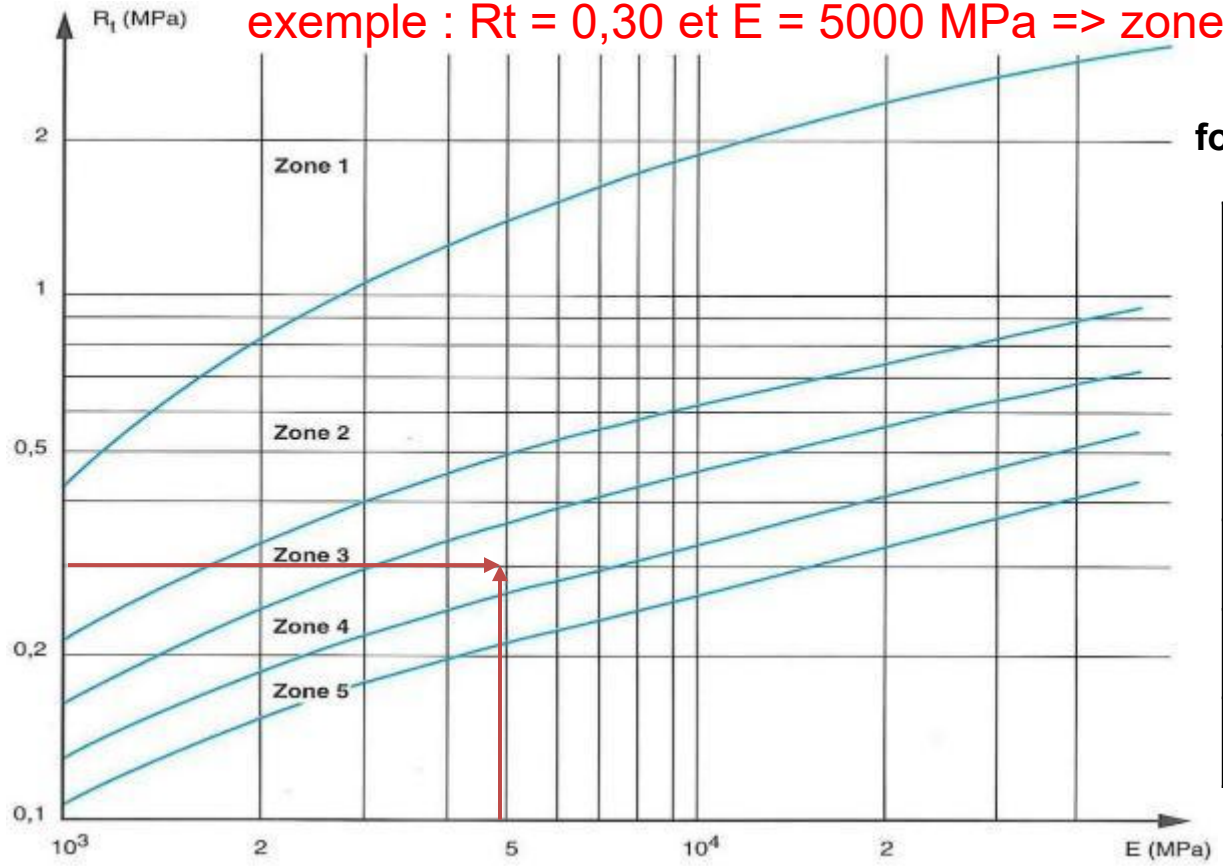
ÉTUDES DE FORMULATION

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 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

exemple : Rt = 0,30 et E = 5000 MPa => zone 4



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

Rt = Rit x 0.8

DIMENSIONNEMENT « COUCHE DE FORME « (2)

ÉPAISSEUR (cm)

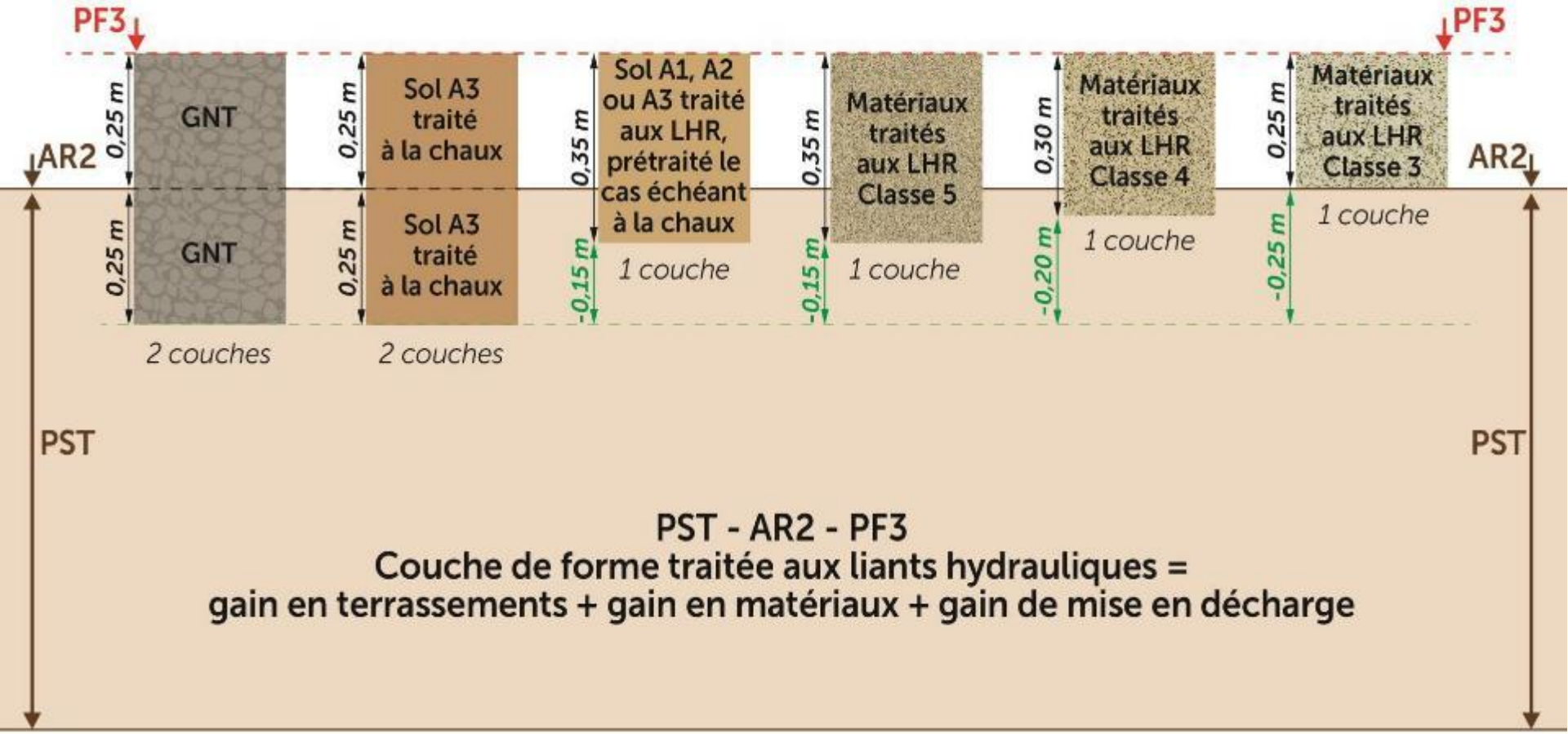
selon classe d'arase et classe mécanique du sol traité

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

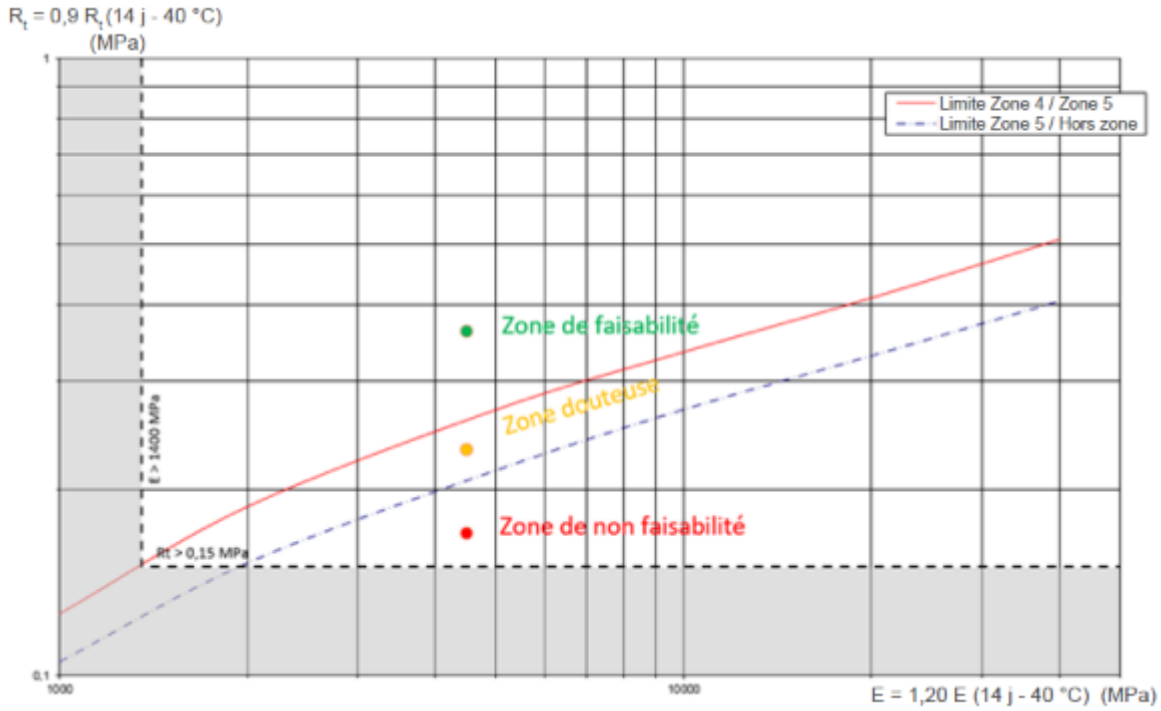


DIMENSIONNEMENT DE COUCHE DE FORME MÉTHODE ACCÉLÉRÉE

- **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

CIMbéton

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).

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 :

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

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)

- ≤ 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

émulsion de bitume

❑ 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

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 ≤ 80 à 100 mm,
    - pour une couche de forme : D ≤ 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

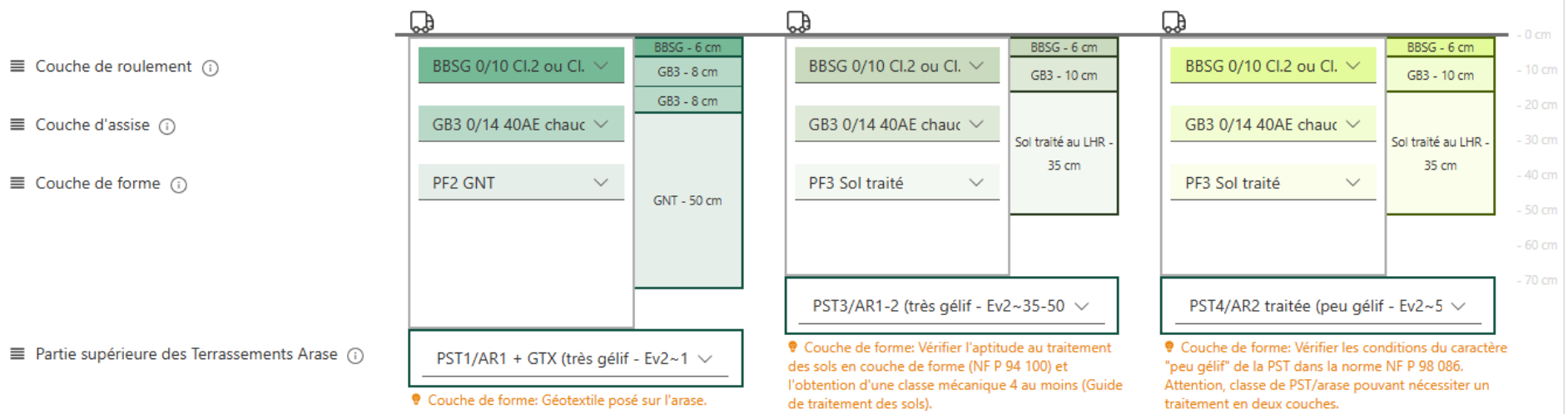
Déflexion

Gammadensimètre

ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE

CIMbéton

IMPACT ENVIRONNEMENTAL DU TRAITEMENT



	PF2 granulaire sur AR1 et géotextile	PF3 traitée sur AR2 naturelle	PF3 traitée sur AR2 traitée
Coût (k€/1000 m²)	48 à 60	31 à 39 (-30 à -50%)	33 à 41 (-30 à -50%)
Co2 (t eq CO2/1000 m²)	35 à 44	39 à 49 (+5 à +15%)	48 à 60 (+30 à +50%)
Ressources (T granulats/1000 m²)	1 195 à 1 462	221 à 271 (< -75%)	221 à 271 (< -75%)
Trafic PL Chantier (PL/1000 m²)	101 à 125	24 à 30 (< -75%)	24 à 30 (< -75%)
Déchets générés (T/1000 m²)	1 166 à 1 426	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)

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

7 cm BBME

35 cm Sol traité (A1 + 6 % de LHR)

Arase traitée

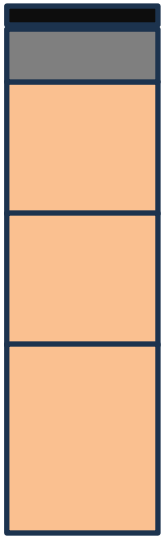
UNE PLATE-FORME PORTUAIRE RO-RO DÉCONTAMINÉE

5 cm BBSG

35 cm Sol traité (A1 + 6 % de LHR)

Arase ~ 20-30 MPa

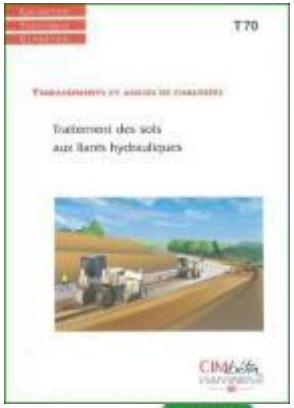
UNE PLATE-FORME DE CHANTIER NAVAL EN VASES TRAITÉES



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

CIMbéton

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

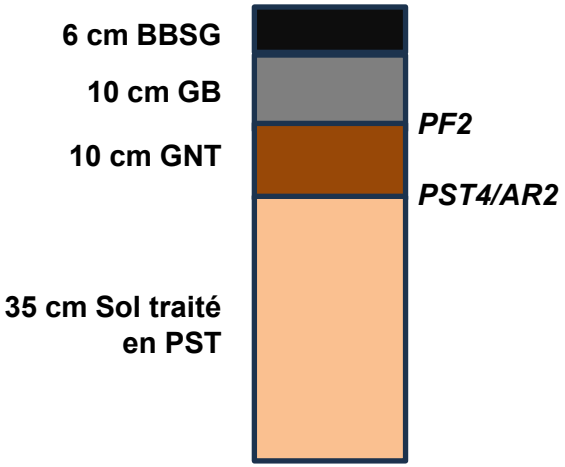
- *Sous-traitance/Location*

- *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

CIMbéton
CENTRE D'INFORMATION SUR LE CIMENT ET SES APPLICATIONS

TERRASSIERS de France
Ils ouvrent la voie