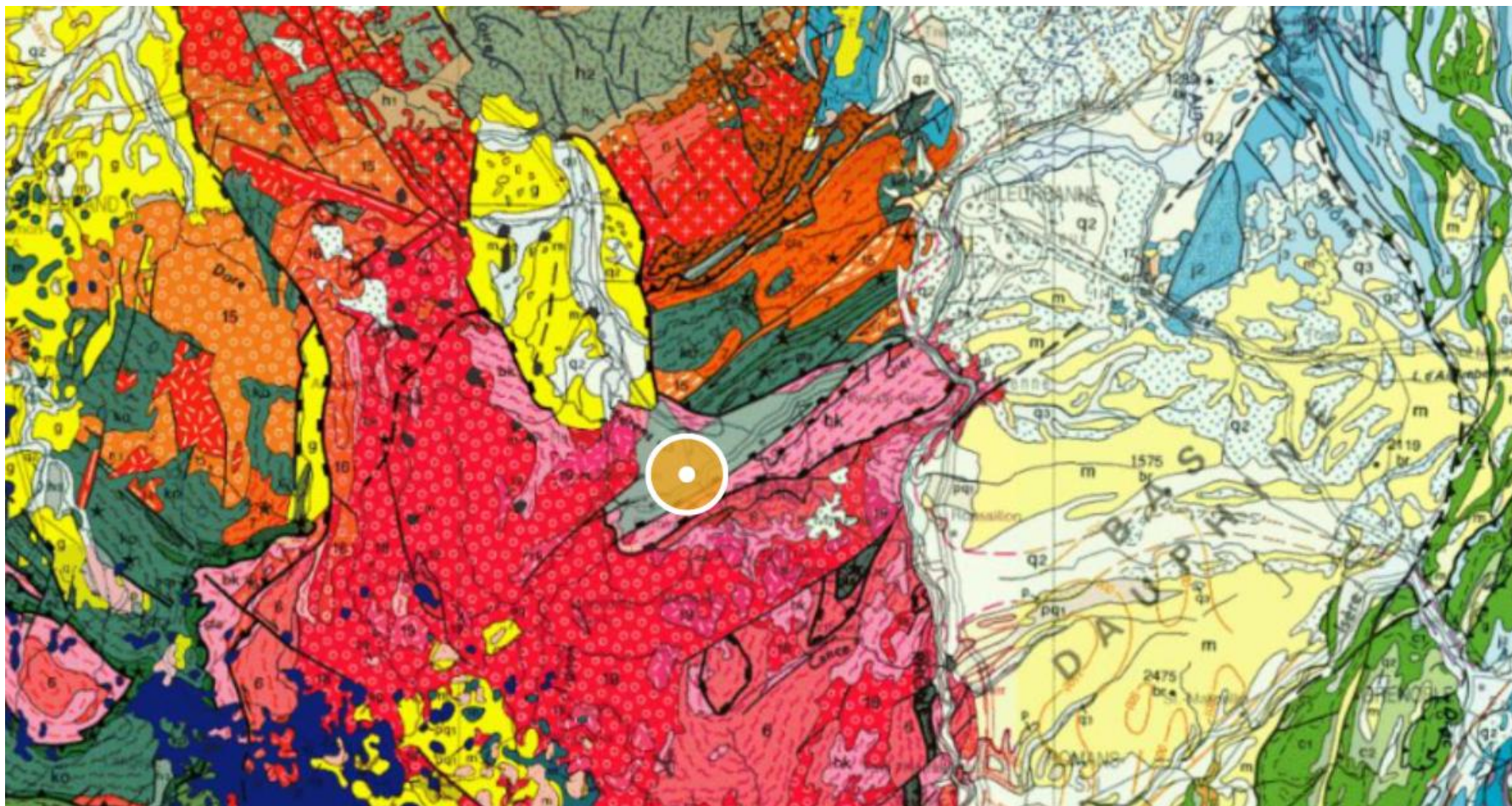


# TRAITEMENT DES SOLS EN PLACE AUX LIANTS HYDRAULIQUES

Valéry FERBER



# REGARD SUR LA GÉOLOGIE LOCALE



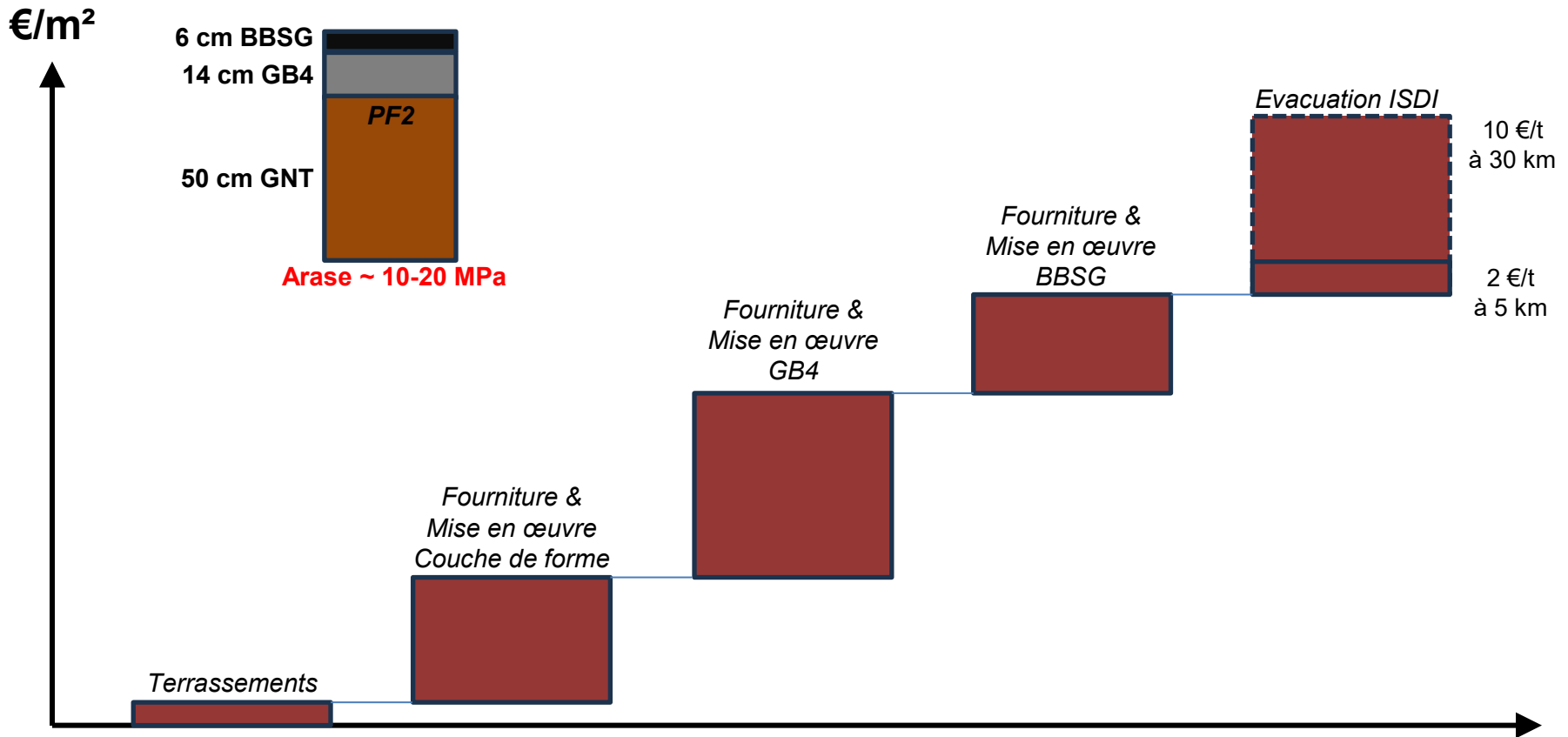


# APPROCHE ÉCONOMIQUE



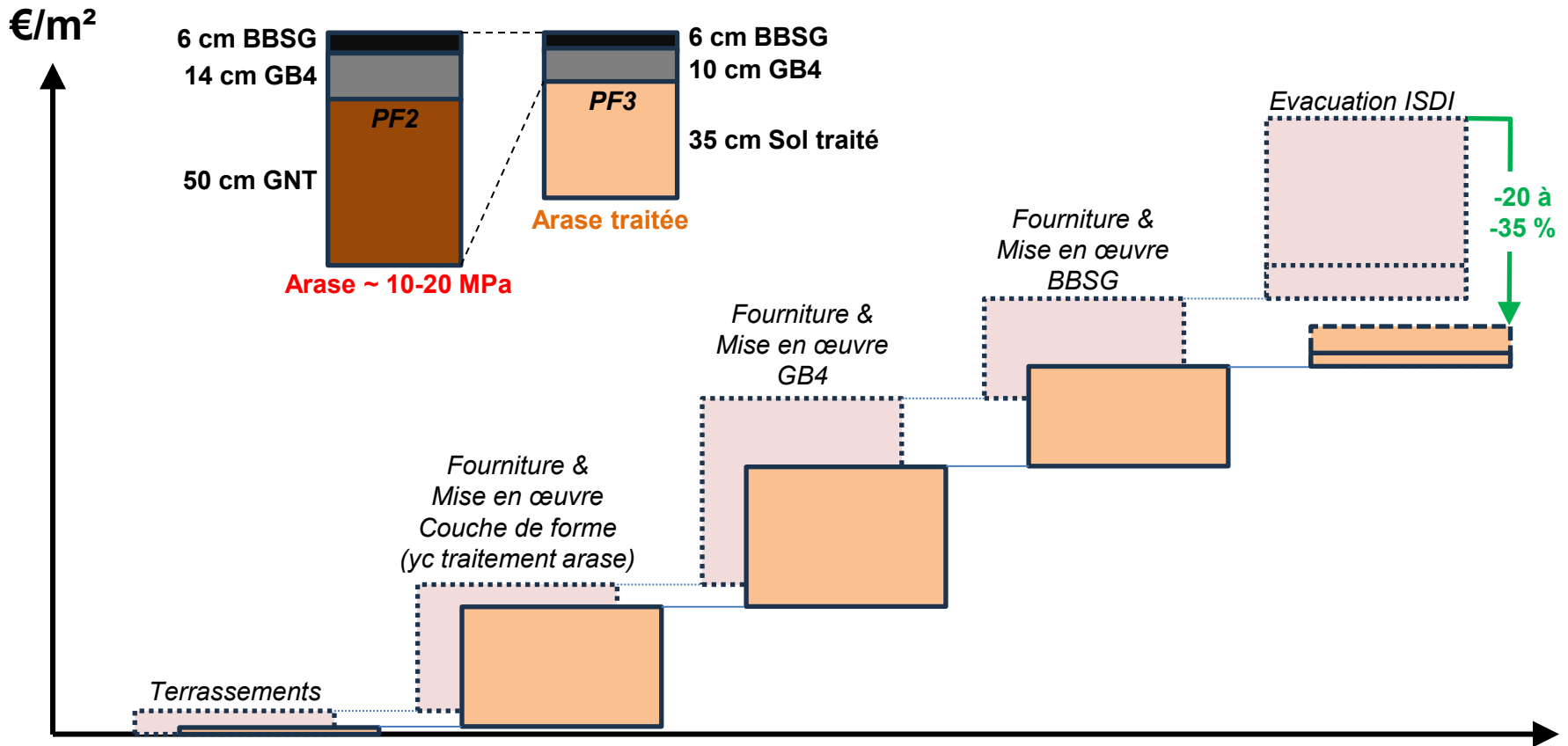
# LA SOLUTION TRADITIONNELLE GRANULAIRE

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



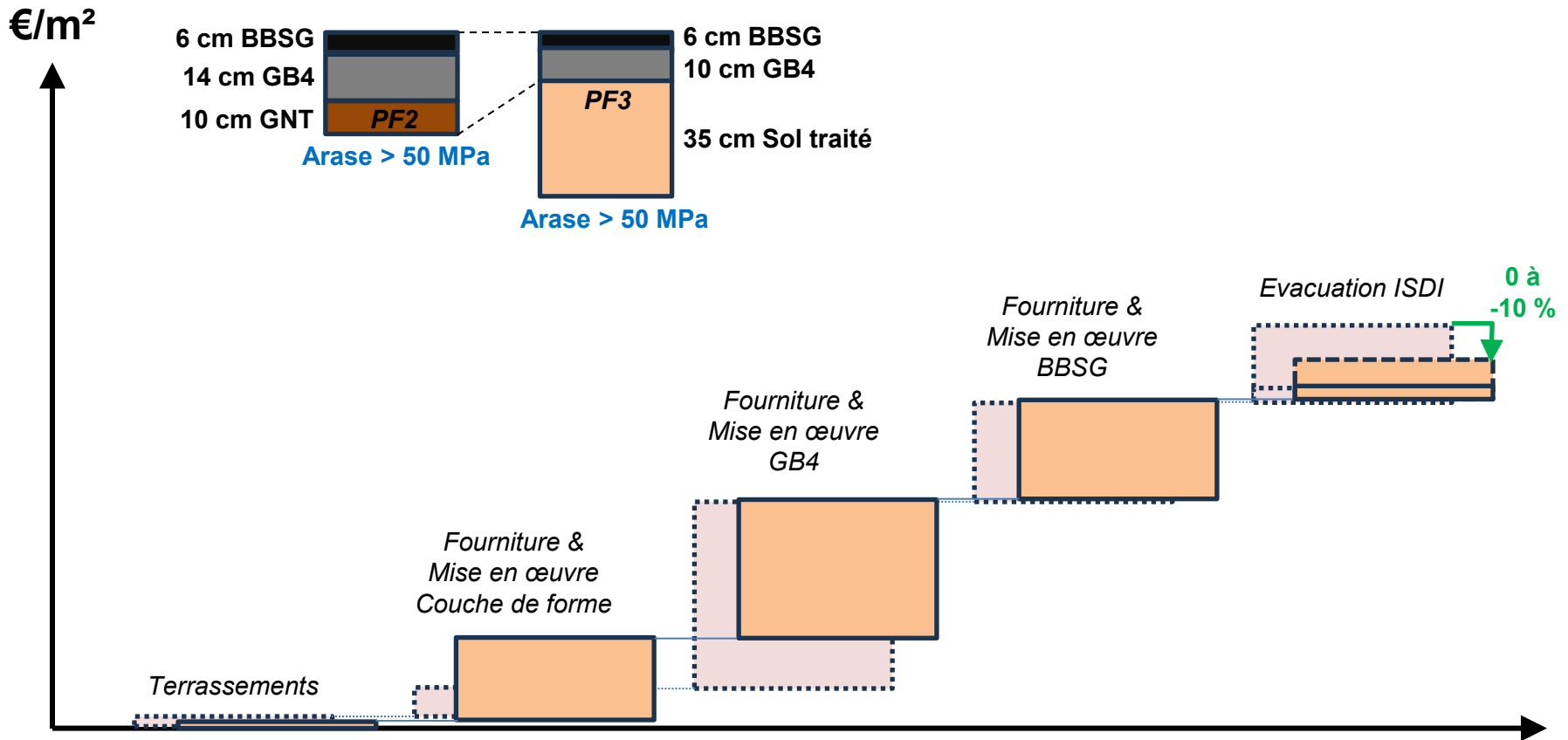
# COMPARAISON GRANULAIRE/TRAITEMENT

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



# COMPARAISON GRANULAIRE/TRAITEMENT

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





# ÉTAT DE L'ART





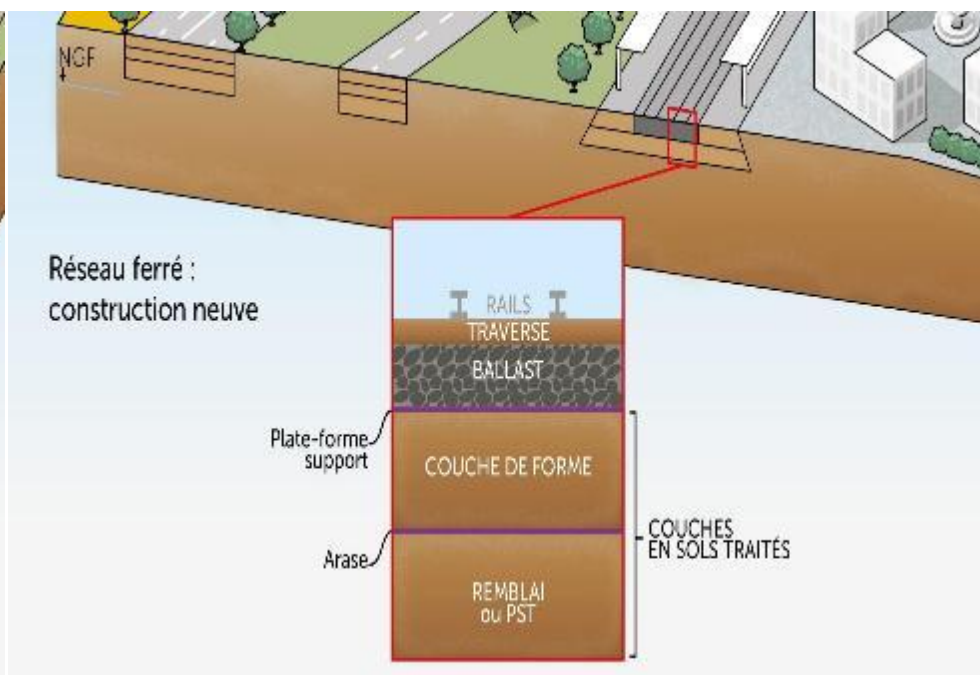
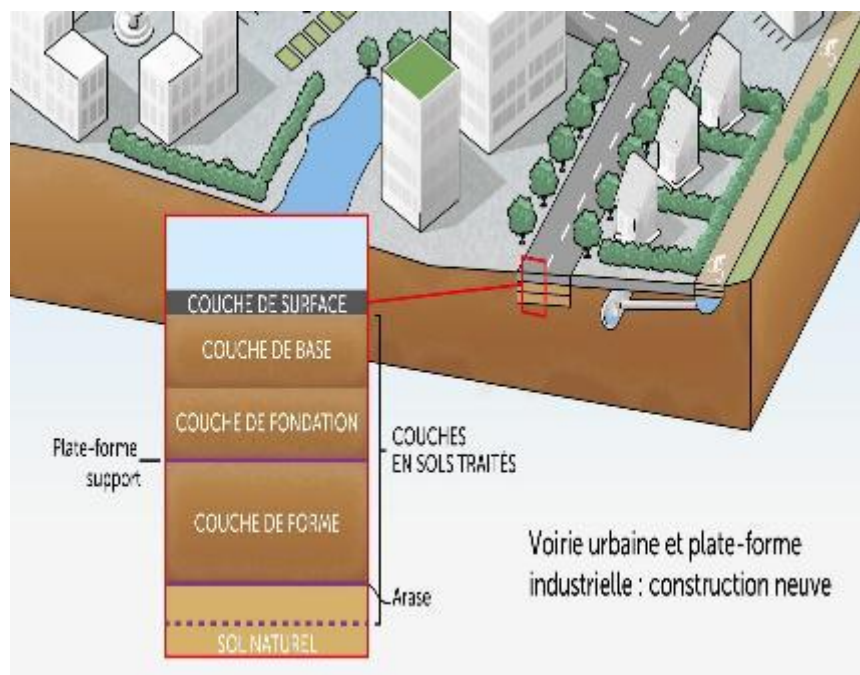
# MARCHÉ DU TRAITEMENT DE SOLS

- ❑ **SURFACES IMPORTANTES** : 10 à 15 millions de 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.

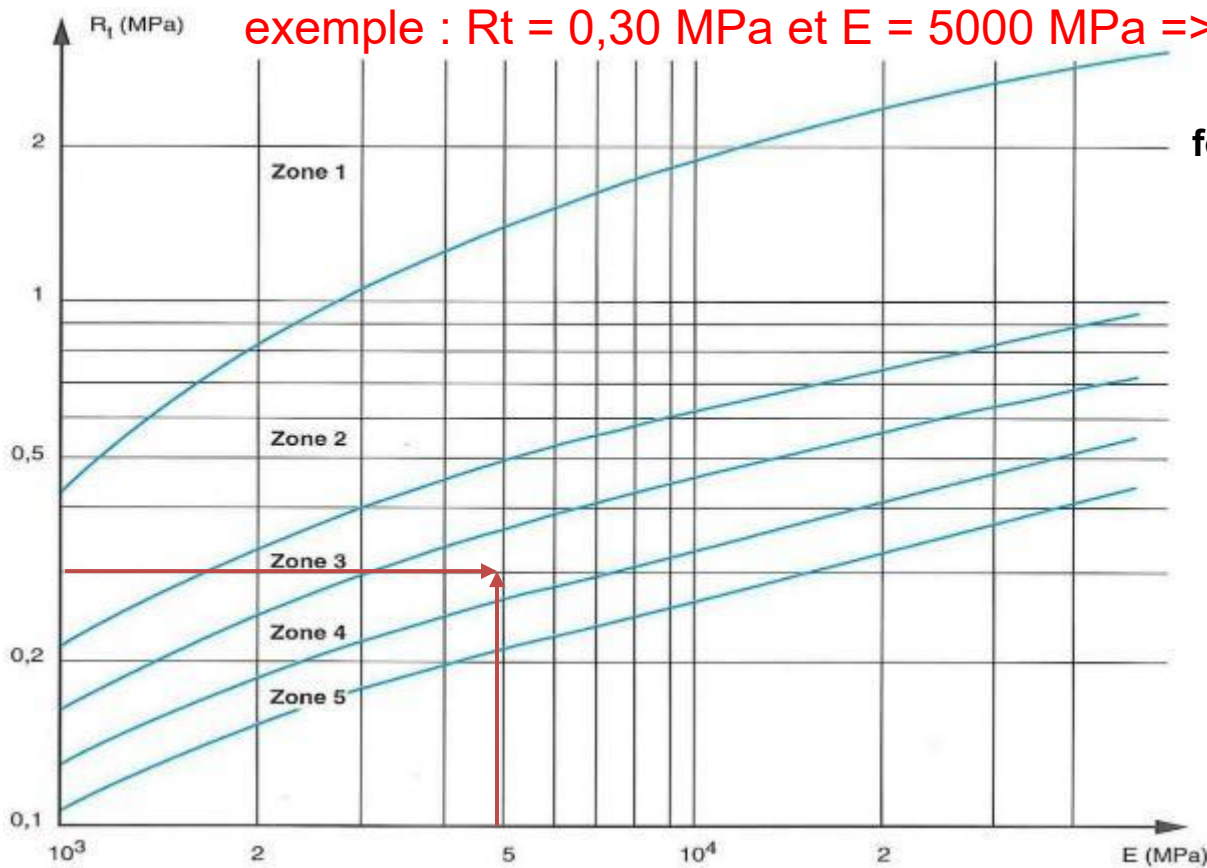


# ÉTUDES DE FORMULATION

Niveaux des Etudes		Nature de l'ouvrage	
Caractéristiques		PST / AR - 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				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*



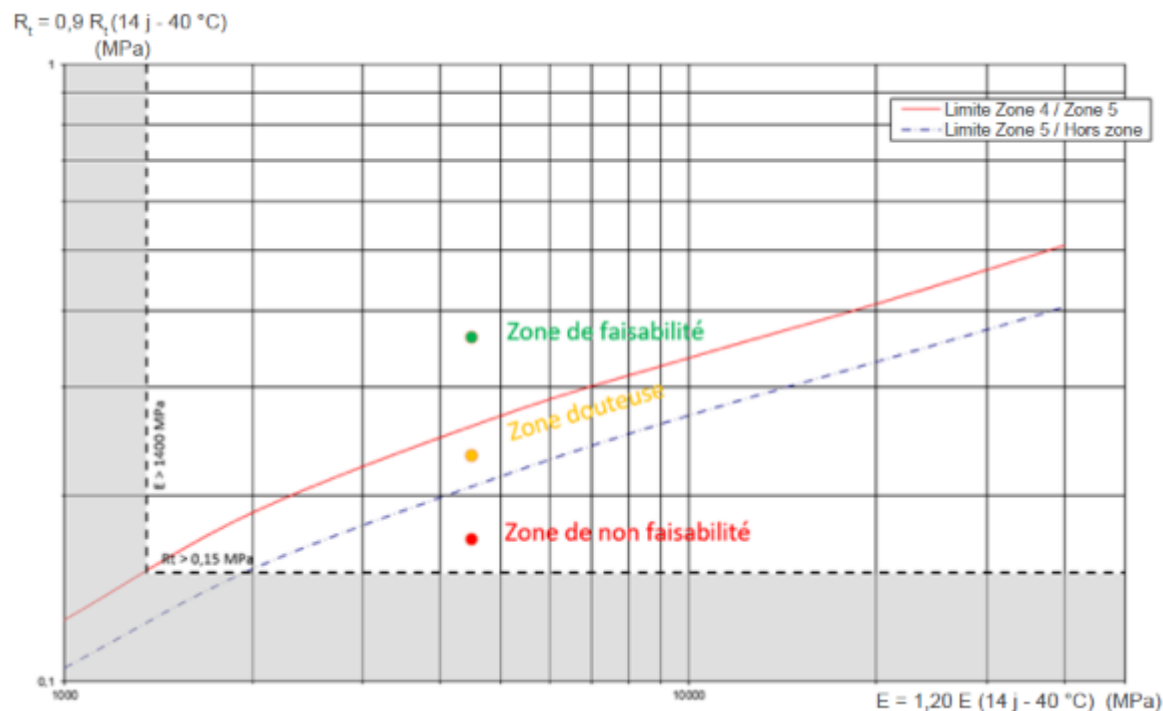
# DIMENSIONNEMENT DE COUCHE DE FORME

## 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 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	<b>60 / 100 mm</b>	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

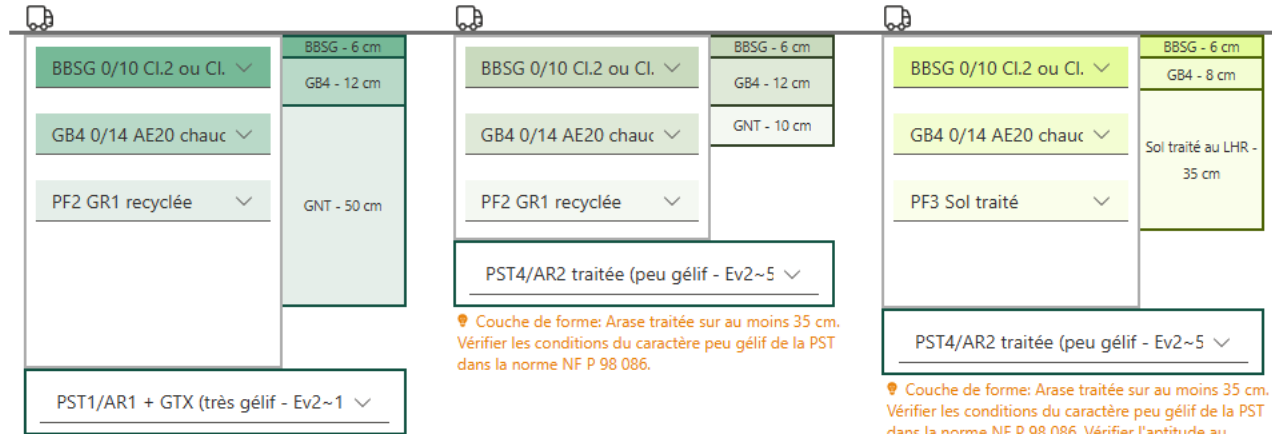
## PF3 traitée sur AR2 traitée

☰ 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).

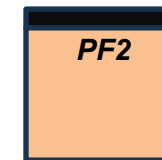
Coût (k€/1000 m <sup>2</sup> ) ⓘ	● 72 à 90	● 47 à 59 (-30 à -50%)	● 40 à 50 (-30 à -50%)
Co2 (t eq CO2/1000 m <sup>2</sup> ) ⓘ	● 32 à 40	● 36 à 46 (+5 à +15%)	● 45 à 56 (+30 à +50%)
Ressources (T granulats/1000 m <sup>2</sup> ) ⓘ	● 320 à 392	● 320 à 392 (0%)	● 254 à 312 (-15 à -30%)
Trafic PL Chantier (PL/1000 m <sup>2</sup> ) ⓘ	● 95 à 117	● 40 à 50 (-50 à -75%)	● 21 à 26 (< -75%)
Déchets générés (T/1000 m <sup>2</sup> ) ⓘ	● 1101 à 1347	● 453 à 555 (-50 à -75%)	● 226 à 278 (< -75%)



# QUELQUES CAS D'APPLICATION



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



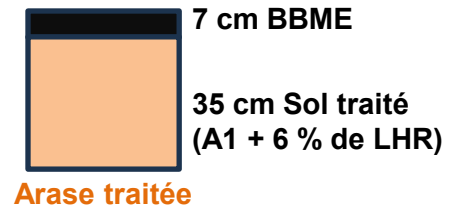
5 cm BBSG

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

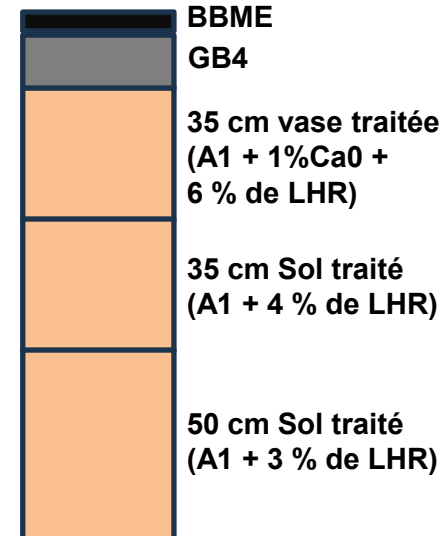


5 cm BBSG

35 cm Sol traité  
(A1 + 6 % de LHR)

Arase ~ 20-30 MPa

# UNE PLATE-FORME DE CHANTIER NAVAL EN VASES TRAITÉES



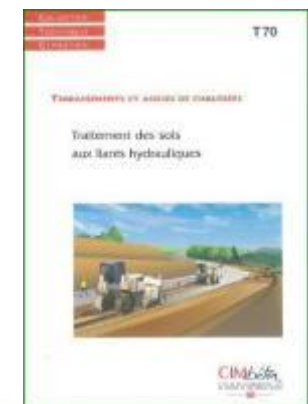


# BIBLIOGRAPHIE



# 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*

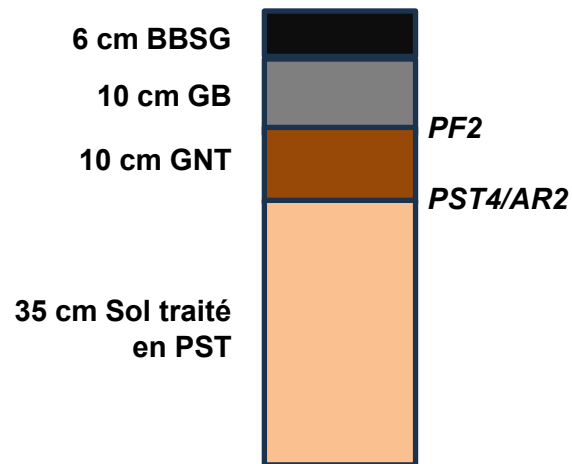


- *Matériel léger*



# 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

