

# TRAITEMENT DES SOLS EN PLACE AUX LIANTS HYDRAULIQUES

Daniel GANDILLE

SYNDICAT PROFESSIONNEL DES TERRASSIERS DE FRANCE





# SOMMAIRE

- ETAT DE L'ART
- ETUDES ET DIMENSIONNEMENT
- MISE EN ŒUVRE / CONTRÔLES
- MARCHE ACTUEL : TENDANCES ET EVOLUTIONS
- BILAN ENVIRONNEMENTAL / SIMULATION « PERCEVAL »
- BIBLIOGRAPHIE





# ÉTAT DE L'ART



# 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).

NB : les sols naturels sont définis par NF P 11-300 / EN 16907.2 / GTR 23

## ❑ INTÉRÊTS :

**Ré-utiliser les sols naturels et donc, le plus souvent, les sols du site =>**

- Préservation des ressources en matériaux nobles (carrières...),
- Diminution des zones de dépôts,
- Suppression des nuisances dues à la circulation des poids lourds sur les voiries publiques desservant le chantier (accidents, bruit, poussières, dégradation des voiries...)

**➔ BILANS ÉCONOMIQUE ET ÉCOLOGIQUE FAVORABLES**

**(voir « PERCEVAL »)**



# INTÉRÊTS PAR RAPPORT AUX MATÉRIAUX GRANULAIRES

## AVANTAGES

- Réduction d'épaisseur à performances équivalentes,
- Obtention de performances mécaniques + élevées (PF4),
- Meilleure protection vis à vis du gel à épaisseur égale,
  - environ + 15% pour sol traité LHR
  - environ + 40% pour sable traité LHR

## LIMITES

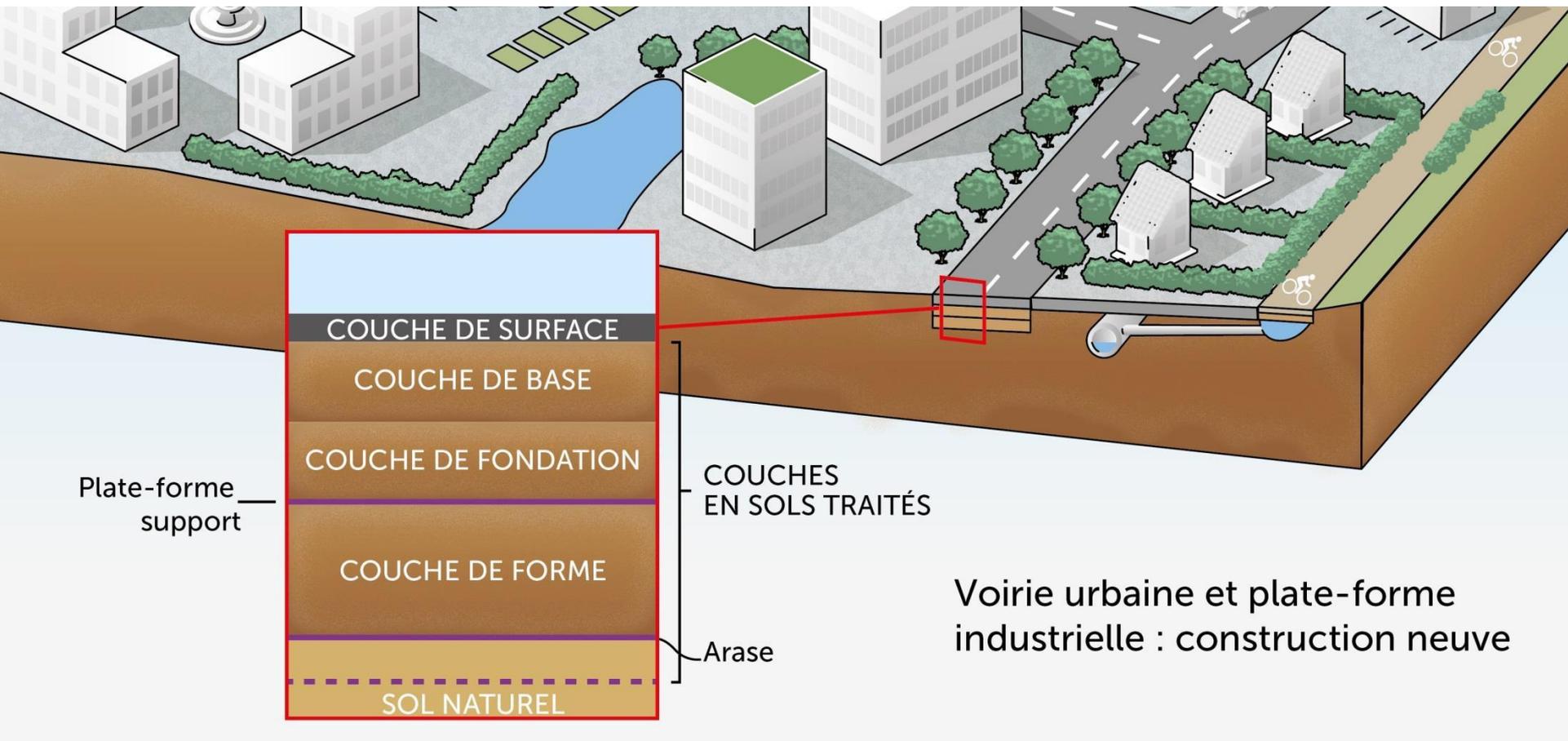
- Mise en œuvre plus « technique »,
- Mise en œuvre tributaire des conditions météorologiques (pluie, vent, gel..)
- Délais à respecter pour :
  - avoir une résistance suffisante pour pouvoir circuler
  - bénéficier de l'insensibilité à l'eau et au gel.
- Fissuration : risque faible (module faible)



**Epaisseurs couche de forme :**  
- GNT = 0,50 m (à gauche)  
- Sol traité = 0,35 m (à droite)

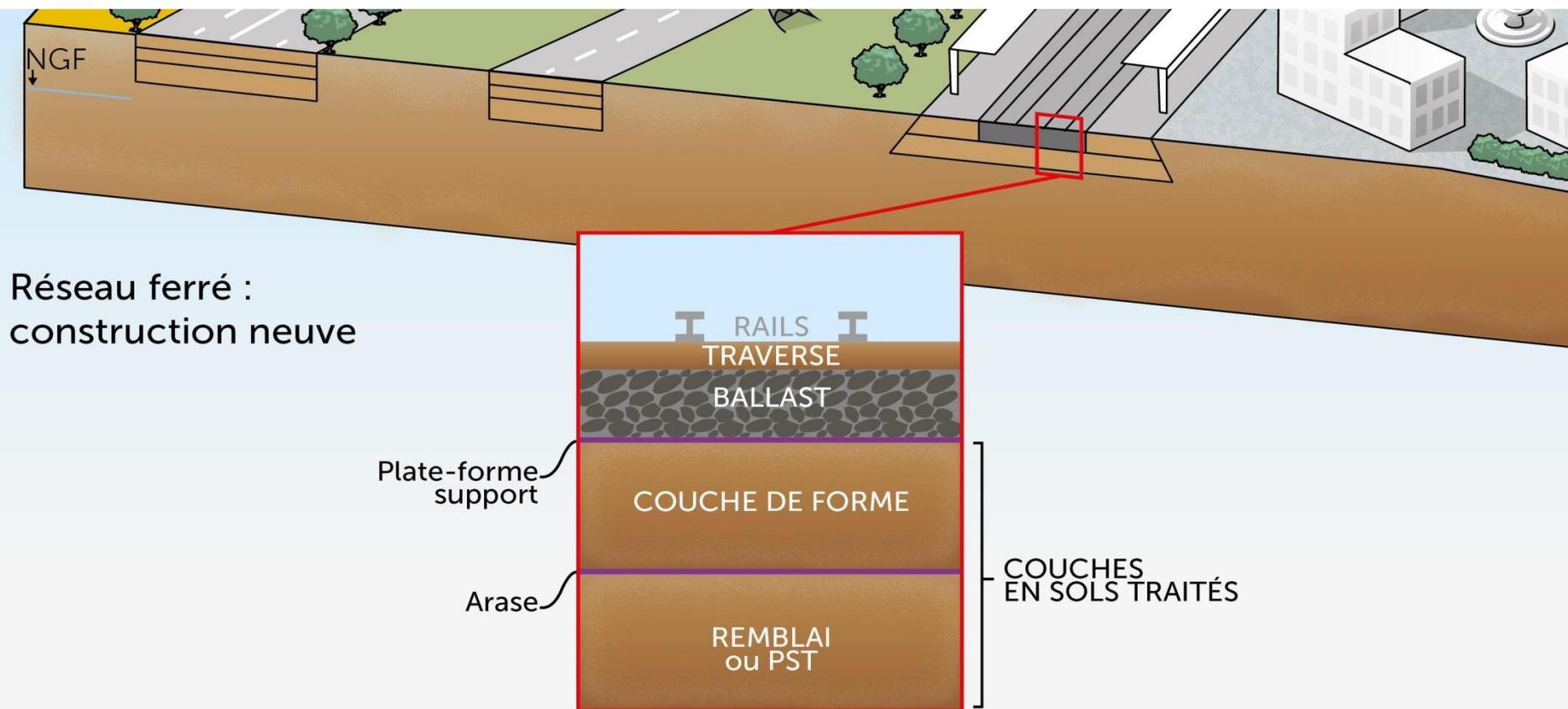
# APPLICATIONS

## Voies (urbaines ou inter-urbaines) – plate-formes industrielles



# APPLICATIONS

## Voies ferrées (LGV.....)



Réseau ferré :  
construction neuve

Plate-forme  
support

Arase

REMBLAI  
ou PST

COUCHES  
EN SOLS TRAITÉS

# CONSÉQUENCES DU TRAITEMENT

## □ soit « AMÉLIORATION »

accroissement, TEMPORAIRE, des caractéristiques géotechniques (essentiellement la teneur en eau, ..)

→ **Objectif : obtention de PORTANCE À COURT TERME permettant :**

- Traficabilité pour les engins de chantier,
- Réalisation et compactage des couches de remblais.

## □ Soit « STABILISATION »

accroissement, PÉRENNE, des caractéristiques géotechniques et mécaniques.

→ **Objectif : obtention de PERFORMANCES MÉCANIQUES DURABLES (exigées pour le dimensionnement) :**

- Résistances, insensibilité à l'eau et au gel...
- Durabilité : validée par le retour d'expérience (recul de plus de 40 ans)
  - pas de problème de vieillissement constaté.
  - les caractéristiques mécaniques continuent de croître.



# AMÉLIORATION / STABILISATION

## TRAITEMENT

### AMÉLIORATION

(traitement à la chaux ou aux LHR)



Aspect avant traitement



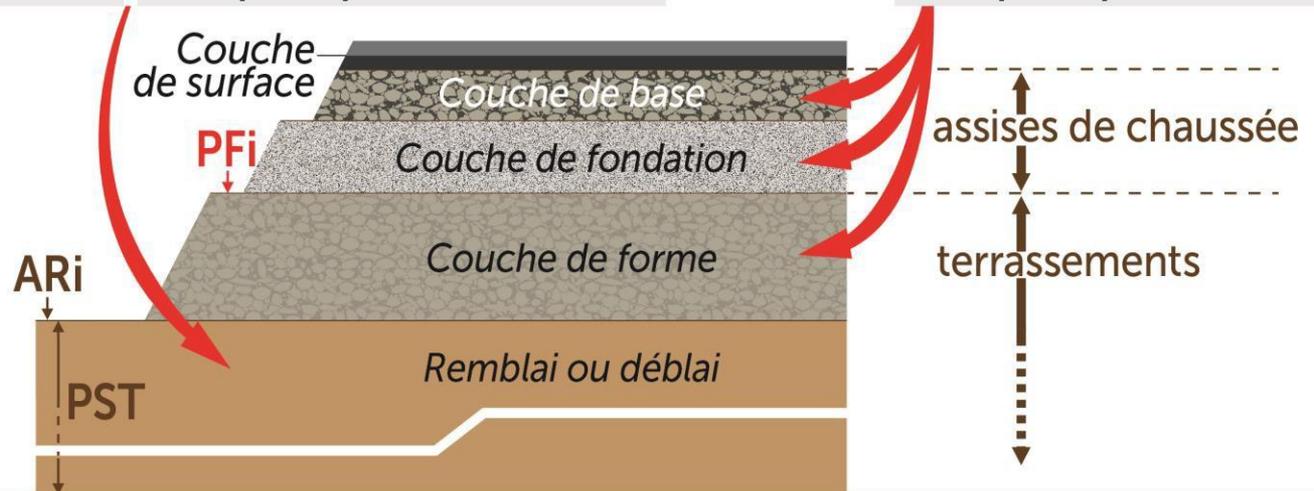
Aspect après traitement

### STABILISATION

(traitement aux LHR ou ciment)



Aspect après traitement





# ÉTUDES ET DIMENSIONNEMENT



# ETUDES PREALABLES - FAISABILITE

## □ HOMOGENEITE DU GISEMENT

Caractérisation par interprétation « statistique » des paramètres d'identification (VBS,  $I_p$ , CG, W%, PN..)

## □ CHOIX DU LIANT HYDRAULIQUE ROUTIER (NF EN 13282 - 1 / 2 / 3)

- **Composition** : clinker, laitier HF, CaO, CV, fillers calcaires, pouzzolane, schistes calcinés... en proportions variables suivant les objectifs recherchés
- **Classes de résistances minimales** (à 56 jours) : 2,5 / 12,5 / 22,5 / 32,5 MPa
- **Délais 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 (gonflement  $G_v\%$  et résistance  $R_{it}$ ).
- **Intérêt** : réponse rapide, moins de 2 semaines (essais à 40°).
- **Limite** : résultats mécaniques non utilisables pour le dimensionnement.



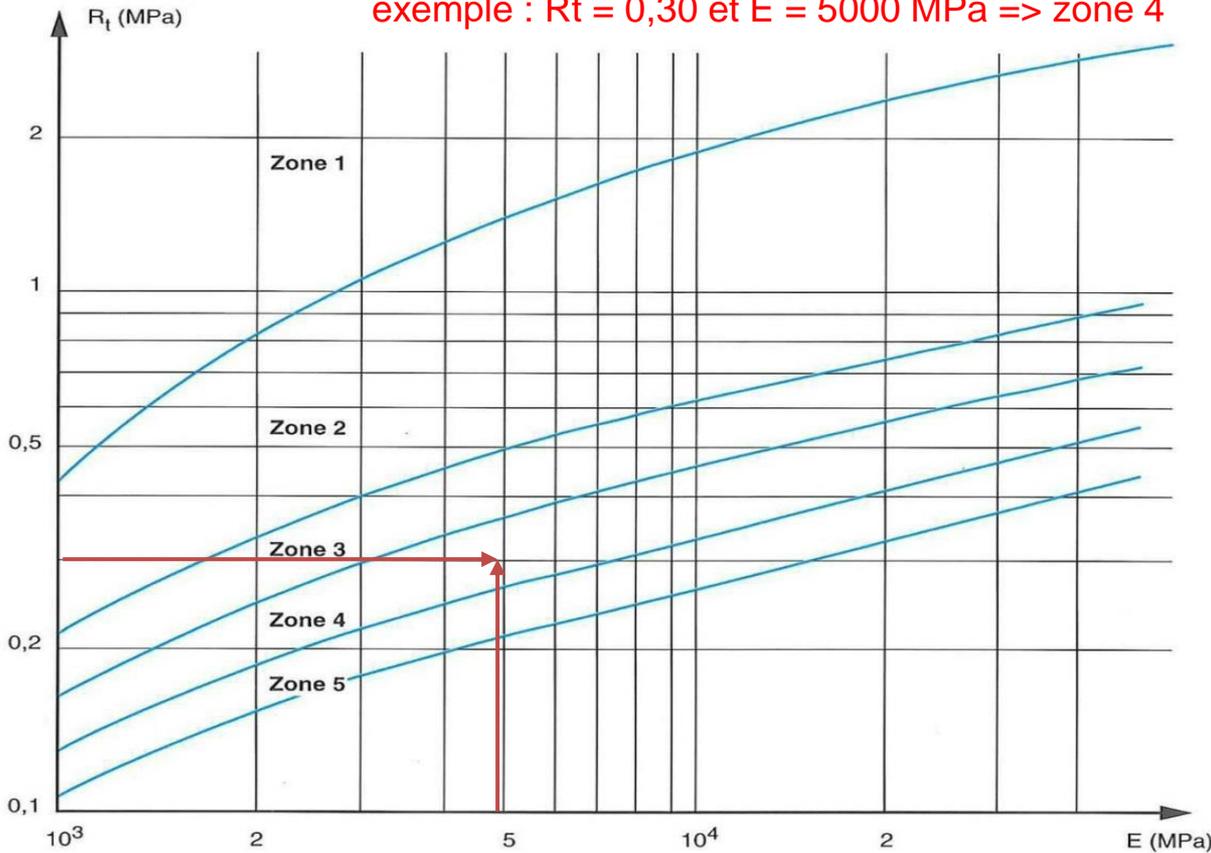
# ÉTUDES DE FORMULATION

Niveaux des Etudes		Nature de l'ouvrage	
Caractéristiques		PST / remblais techniques	Couche de Forme / Assises de Chaussées
<b>Niveau 1</b>	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	$CBR_i (4 \text{ j}) > IPI$	$R_{c-im} (28+32) / R_c (\text{à } 60 \text{ j}) :$ - soit $> 0,8$ si $VBs < 0,5$ - 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)	$R_t/E$ 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)
<b>Niveau 2</b>	Sensibilité aux variations	-	variations de la teneur en eau et de la masse volumique (compacité)

# DIMENSIONNEMENT COUCHE DE FORME (1)

## DIAGRAMME « Rt / E » - classes / zones mécaniques

exemple :  $R_t = 0,30$  et  $E = 5000$  MPa  $\Rightarrow$  zone 4



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

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

# DIMENSIONNEMENT COUCHE DE FORME (2)

Classe de l'arase	COUCHE DE FORME					Classe de la plate-forme support
	MATERIAUX NON TRAITES	Sols argileux (A3) traités à la chaux seule	MATERIAUX TRAITES			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>R22, R42, R62, B41, R11</li> <li>C1 ou C2 (B21, B41, B51)</li> </ul> (après élimination de la fraction grossière et de la fraction 0/d)		<ul style="list-style-type: none"> <li>Sols argilo-limoneux (A1, A2, A3) et sablo-limoneux (B4, B5, B6) traités au liant hydraulique (ciment ou LHR), éventuellement prétraités à la chaux.</li> <li>Sols grenus propres traités aux liants hydrauliques</li> </ul>			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>R21, R41, R61, D31</li> <li>C1 ou C2 (B11, B31)</li> </ul> (après élimination de la fraction grossière)		Classe 5	Classe 4	Classe 3	
AR1 EV2 > 20 MPa	PST1 (état « h ») - 0,60 à 0.75 m	0,50 m*	0,35 m	0,30 m	non autorisée	PF2
	PST2 (état « m ») - 0,50 m					
	PST3 (état « m ») - 0,35 à 0.40 m					
	PST1 - 0,75 à 1 m	0,60 m*	0,45 m*	0,35 m	non autorisée	PF2qs
	PST2 - 0,65 à 0.75 m					
	PST3 - 0,55 à 0.65 m					
	PST2 - 0,80 m**	0,70 m*	0,50 m*	0,35 m	0,30 m	PF3
PST3 - 0,90 m**						
EV2 non atteignable	EV2 Non atteignable	0,55 m*	0,45 m*	0,40 m	PF4	
AR2 EV2 > 50 MPa – insensible à l'eau	PST3 (état « m » et conditions drainage) – 0.35 à 0.40 m	0,45 m*	0,30 m	0,25 m	non autorisée	PF2qs
	PST4 (rendue insensible à l'eau par traitement) – 0.30 à 0.40 m					
	PST5/6 (naturellement insensibles à l'eau) – 0.35 à 0.40 m					
	0,50 m	0,50 m*	0,35 m	0,30 m	0,25 m	PF3
	EV2 non atteignable	EV2 non atteignable	0,45 m*	0,35 m	0,30 m	PF4

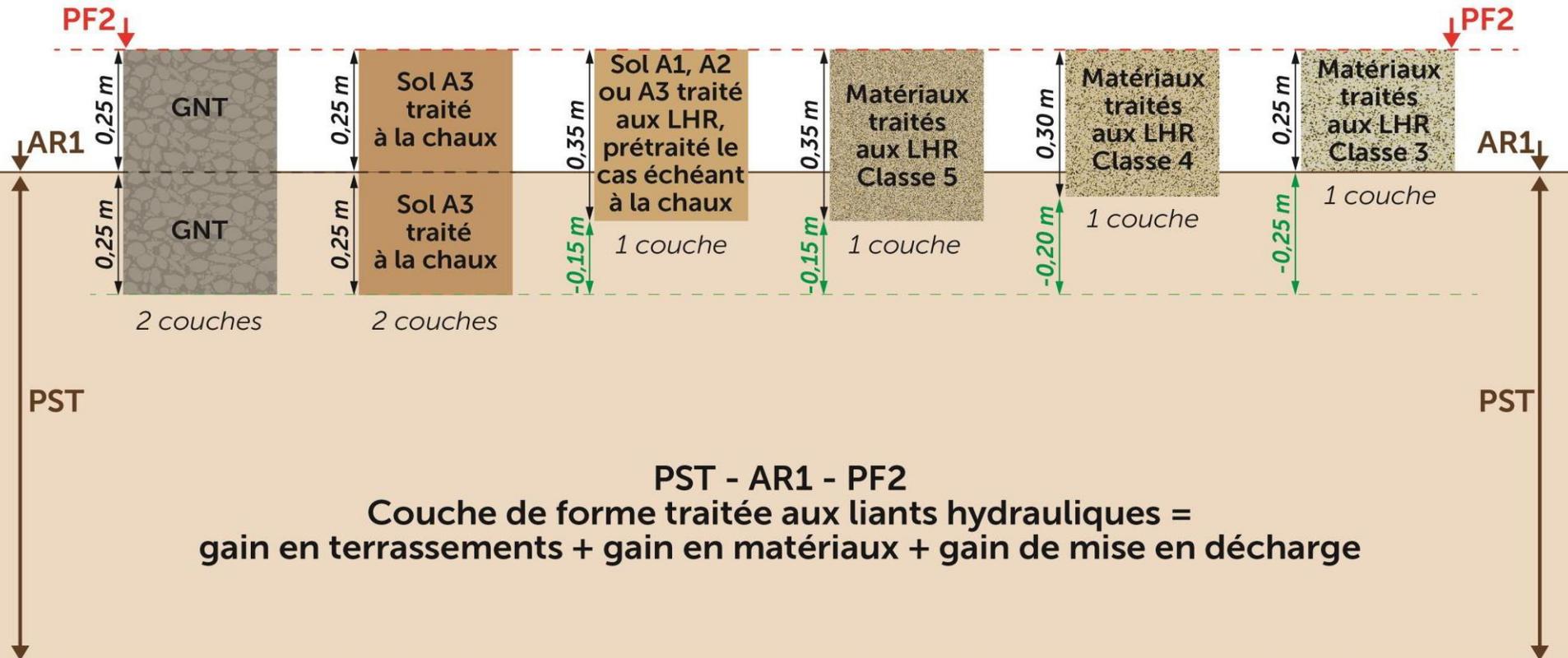
\* : traitement en 2 couches

\*\* : certains matériaux ne permettent pas d'atteindre ce niveau de portance (EV2 > 120 MPa) => à vérifier sur planche d'essais ou par REX

# DIMENSIONNEMENT COUCHE DE FORME (3)

## PF2 sur AR1

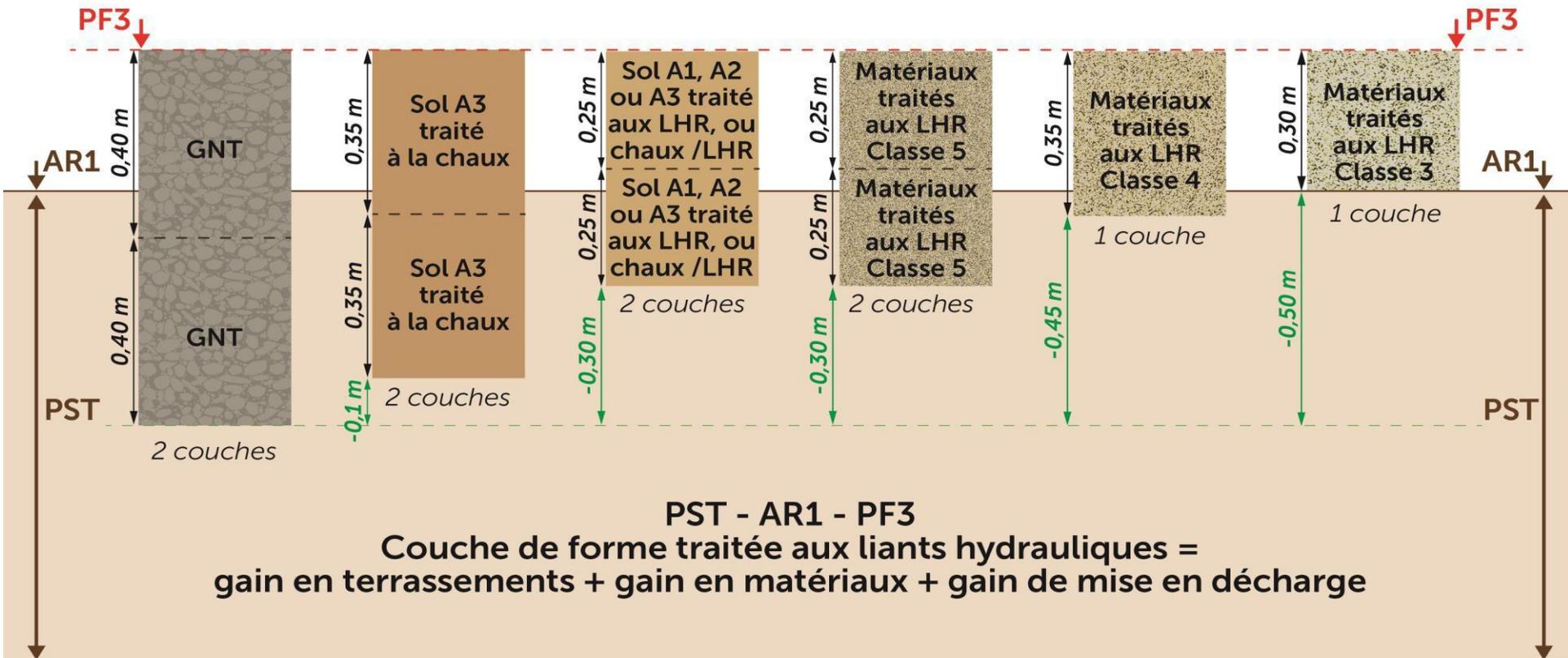
**0,50 m GNT =**  
**0,35 m « C5/Z4 » ou 0,30 m « C4/Z3 » ou 0,25 m « C3/Z2 »**



# DIMENSIONNEMENT COUCHE DE FORME (4)

## PF3 sur AR1

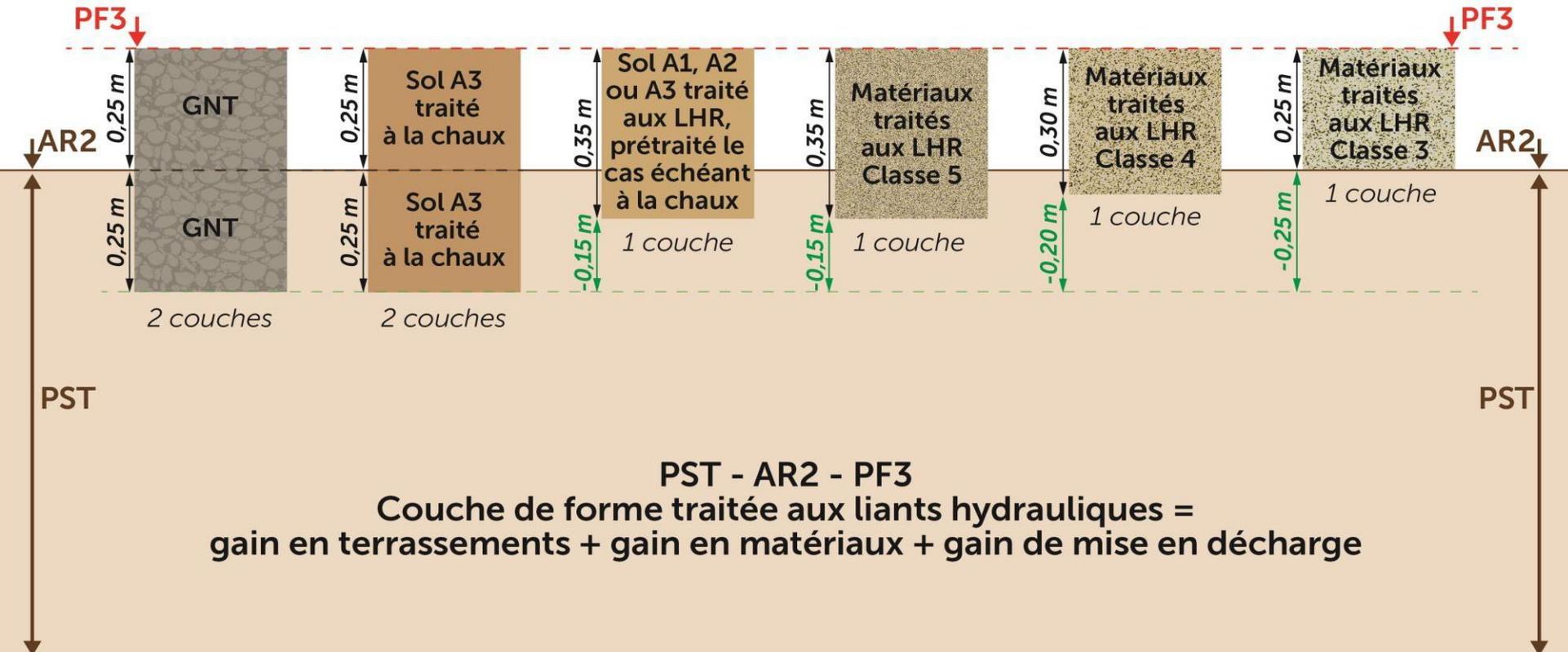
**0,80 m GNT =**  
**0,50 m « C5/Z4 » ou 0,35 m « C4/Z3 » ou 0,30 m « C3/Z2 »**



# DIMENSIONNEMENT COUCHE DE FORME (5)

## PF3 sur AR2

**0,50 m GNT =**  
**0,35 m « C5/Z4 » ou 0,30 m « C4/Z3 » ou 0,25 m « C3/Z2 »**

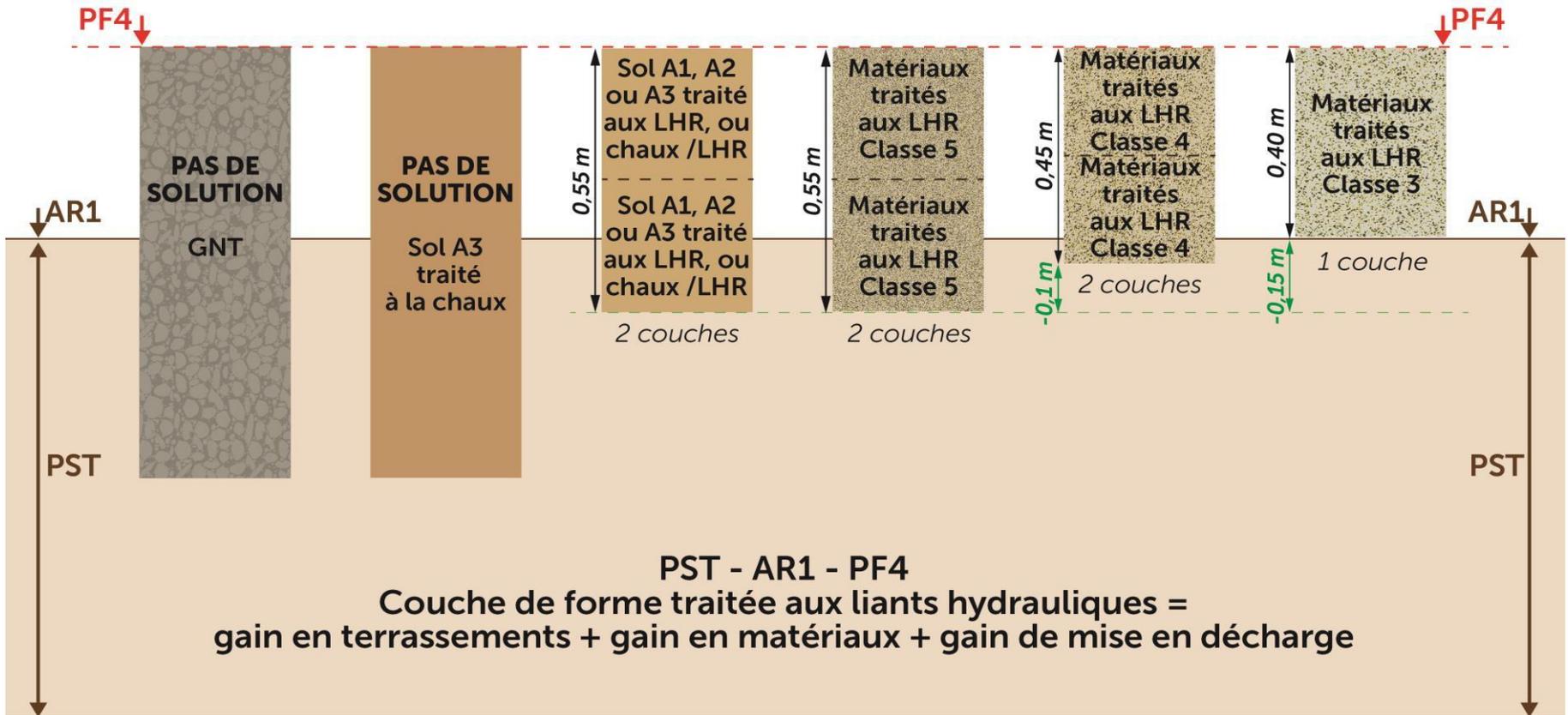


# DIMENSIONNEMENT COUCHE DE FORME (6)

## PF4 sur AR1

**GNT = IMPOSSIBLE**

**0,55 m « C5/Z4 » ou 0,45 m « C4/Z3 » ou 0,40 m « C3/Z2 »**

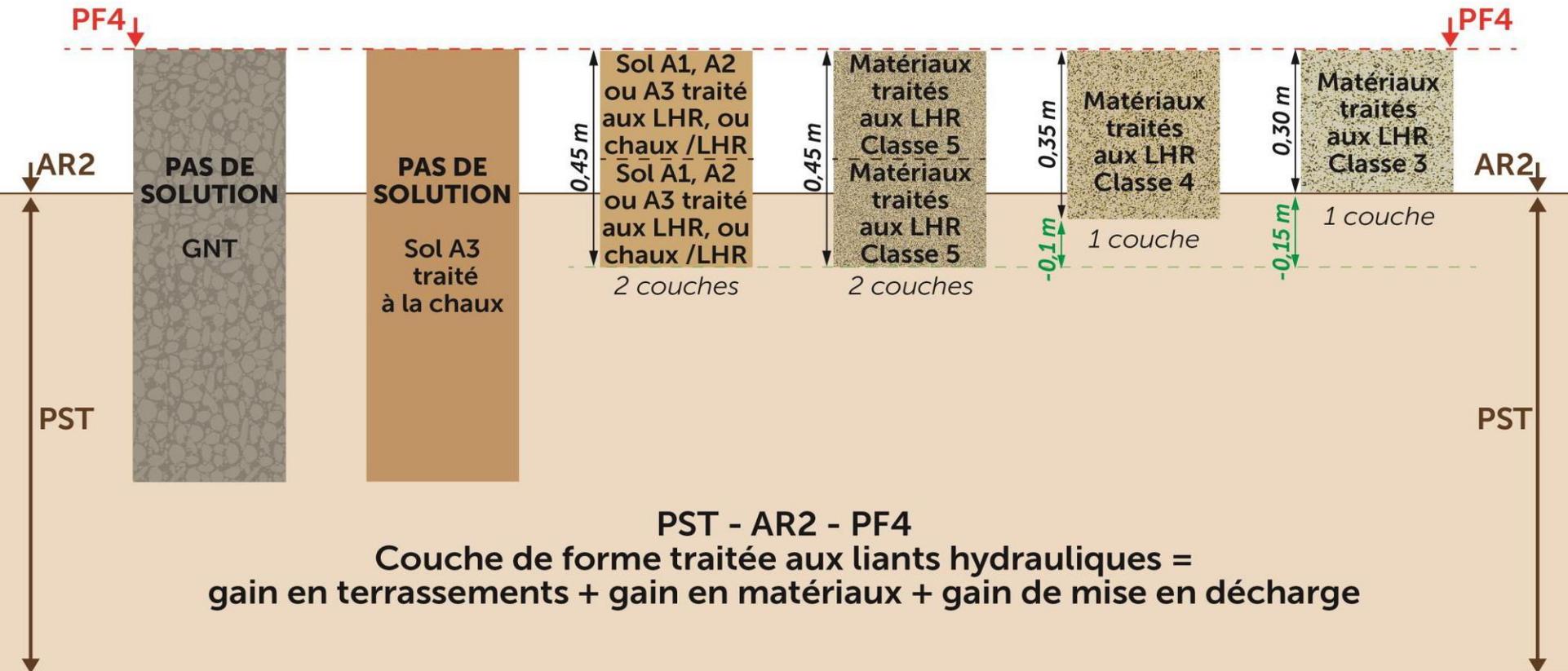


# DIMENSIONNEMENT COUCHE DE FORME (7)

## PF4 sur AR2

GNT = IMPOSSIBLE

0,45 m « C5/Z4 » ou 0,35 m « C4/Z3 » ou 0,30 m « C3/Z2 »



# DIMENSIONNEMENT COUCHE DE FORME (8)

## □ CAS DES « PETITS » CHANTIERS (taille, durée, moyens...)

### ■ Selon GTS

Classes de sols	dosages préconisés pour PF2
(C) - A1- B5	1 % CaO + 7 % LHR
(C) – A2 – B6	1,5 % CaO + 7 % LHR
(C) – A3	2 % CaO + 7 % LHR ou 6 % CaO
(C) – B3 – B4 et D2 – D3	5 % LHR

### ■ Nouvelle méthode d'étude (en attente de publication)

*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).*

*Une note d'information « IDRRIM », validant ses conclusions, est en cours de publication.*





# 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 homogène (surface et épaisseur),
- **Injection dans la cloche du malaxeur** : répartition homogène (surface et épaisseur).

queue de carpe



arroseuse-enfouisseuse



injection d'eau dans la cloche du malaxeur



# EPANDAGE 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 :

- Décohésionner 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



charrue (chaux)



malaxeur tracté



malaxeur automoteur



# COMPACTAGE

- ❑ **OBJECTIF** : obtenir la compacité visée (q4, q3, q2)
- ❑ **COMPACTEURS** :
  - **Compacteur vibrant monobille lisse ou à pieds dameurs** : densification jusqu'au fond de couche,
  - **Compacteur à pneus** : densification de surface et lissage de la plate-forme (contribue à réduire le feuilletage).



# RÉGLAGE FIN / NIVELLEMENT

## ❑ OBJECTIFS « COURANTS » :

- couche de forme : +/- 3 cm
- couche de chaussées : +/- 3 cm (fondation) et +/- 2 cm (base).

## ❑ MATERIELS :

- niveleuse
- 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 0/0,4 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



Déflectographe « Iacroix »



Gammadensimètre



Portancemètre



# MARCHÉ ACTUEL, TENDANCES ET ÉVOLUTION TECHNIQUE



# MARCHÉ ACTUEL ET TENDANCES

- ❑ **MARCHE EN PLEIN ESSOR (lié au développement économique) :**  
Plates-formes routières, autoroutières, ferroviaires, industrielles, commerciales ou multimodales.....
  - ❑ **ENJEUX IMPORTANTS :**  
10 à 15 millions de m<sup>2</sup> / an (en France)
  - ❑ **TECHNIQUE CODIFIÉE :**  
Guides, normes, DTU...
  - ❑ **REALISATION MAÎTRISÉE :**  
Entreprises compétentes, procédés fiables, retours d'expérience...
- **...mais les exigences économiques et environnementales actuelles nécessitent de faire évoluer la conception et la réalisation des ouvrages en sols traités**



# ÉVOLUTION TECHNIQUE (1)

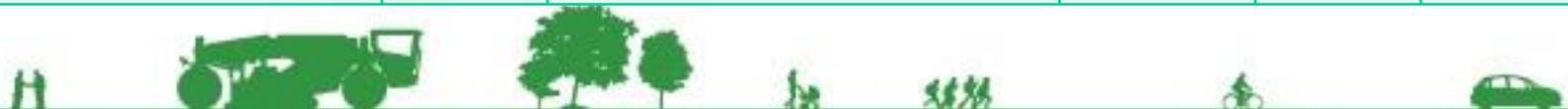
## ❑ CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT :

Dans le passé on a sans doute plutôt cherché à optimiser les structures d'assises, indépendamment et au détriment du support « terrassements »

## ❑ ENJEUX :

Pour des raisons environnementales (et économiques), il faut réduire l'apport de matériaux nobles au profit de matériaux « naturels » traités. Pour ce faire, il faut penser le dimensionnement de la structure dans sa globalité, ce qui conduit à augmenter les performances du support « terrassements » (**PF3 ou PF4**) au détriment des couches d'assises et même à utiliser des **sols traités en assises** (lorsque cela est permis, voir tableau ci-dessous)

Classe trafic	T5	T4	T3	T2	T1
Couche base	Sol T2	Sol T2 (sablo-graveleux)	Sol T3	/	/
Couche fondation	Sol T1	Sol T1	Sol T2	Sol T2	Sol T3



# ÉVOLUTION TECHNIQUE (2)

<b>CONCEPTION « CLASSIQUE »</b> Prépondérance aux performances des couches d'assises	<b>CONCEPTION A VALORISER</b> Prépondérance au « support » et au traitement des sols naturels du site
<ul style="list-style-type: none"><li>• épaissement des couches d'assises « nobles » (GB, GC...)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• recherche d'un niveau de plate-forme élevé : AR2 et PF3 ou PF4</li><li>• utilisation en assises, lorsque cela est permis, des sols du site traités au LH</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• sollicitation plus faible du support « terrassements » (couche de forme, PST...) =&gt; moindre nécessité de les valoriser</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• réduction des couches d'assises « nobles » (GB, GC...)</li></ul>
<ul style="list-style-type: none"><li>• valorisation des matériaux « nobles » au détriment des matériaux du site =&gt; augmentation du volume des matériaux « nobles » et des matériaux mis en dépôt</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• réduction du recours aux matériaux « nobles » (extérieurs au chantier)</li><li>• réduction du volume des matériaux mis en dépôt</li></ul>



# **SIMULATION « PERCEVAL »**

## **DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES INTERÊT DES PF3 ET PF4**

**[www.infociments.fr](http://www.infociments.fr)**

**<https://www.infociments.fr/calculateur-perceval>**

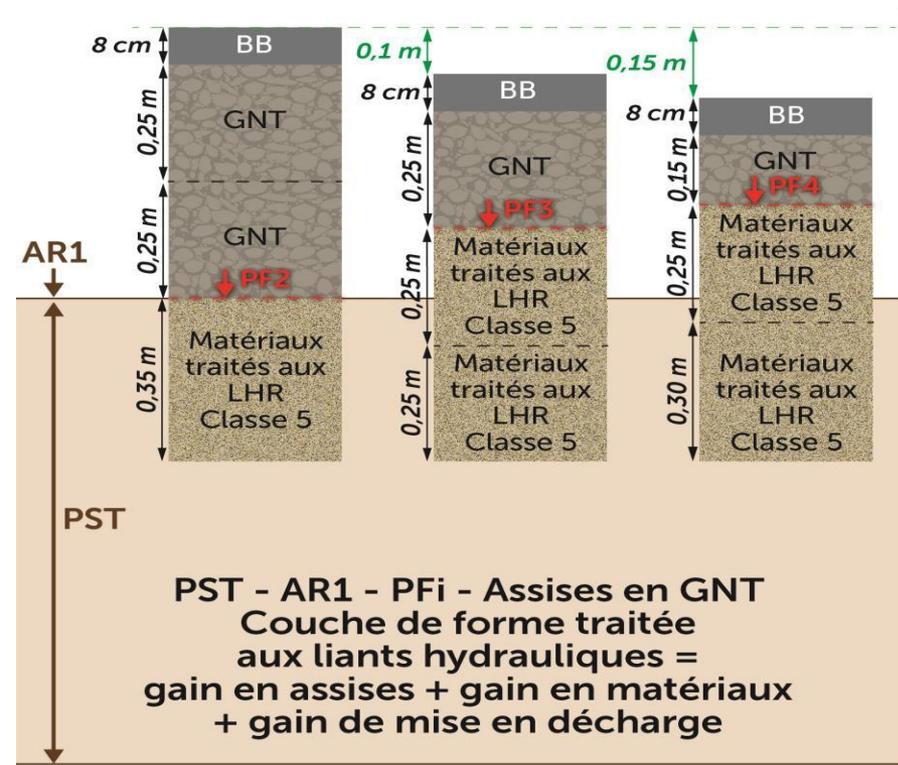


# DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES (1)

## INTERÊT DES PF3 ET PF4

### GNT sur AR1 / PF2, 3, 4 (C5/Z4)

PF2 35 cm sol TLH -> Assise = 50 cm GNT  
 PF3 50 cm sol TLH -> Assise = 25 cm GNT  
 PF4 55 cm sol TLH -> Assise = 15 cm GNT



	PF2	PF3	PF4
	0,35 m sol traité 0,50 m GNT	0,50 m sol traité 0,25 m GNT	0,55 m sol traité 0,15 m GNT
Epaisseur totale (cm)	93	83 (- 10 cm)	78 (- 15 cm)
CO <sub>2</sub> (kg eq./m <sup>2</sup> )	22	3%	3%
Energie (MJ/m <sup>2</sup> )	715	-7%	-9%
Ressources nat. (Sb)	4,2.E <sup>-5</sup>	-19%	-26%
Eau (litres/m <sup>2</sup> )	111	-0,5%	-2,1%
€/ m <sup>2</sup>	67	-29%	-40%

# DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES (1)

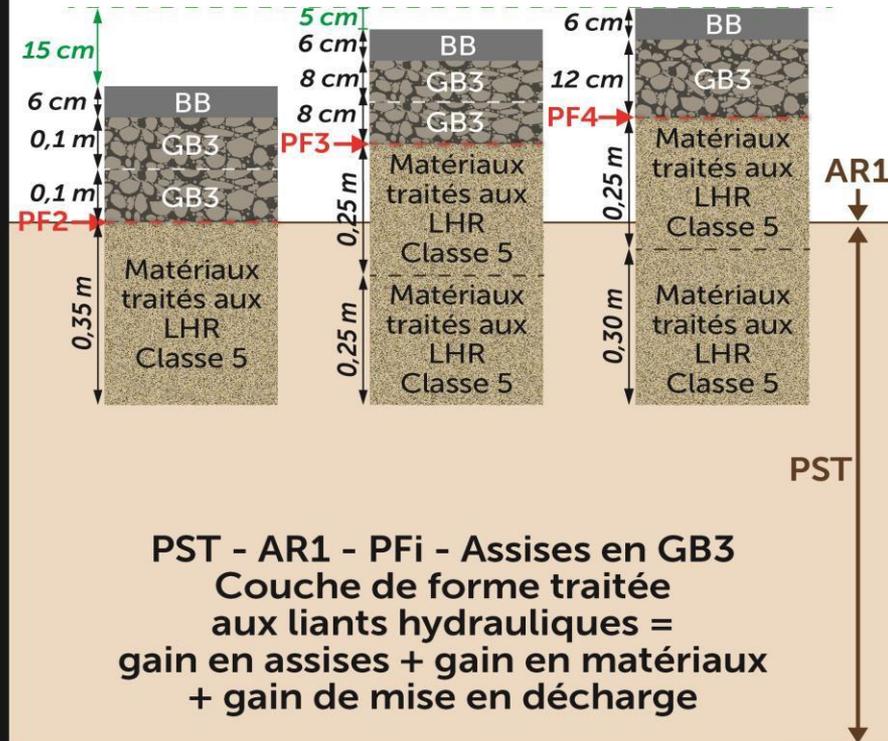
## INTERÊT DES PF3 ET PF4

### GB3 sur AR1 / PF2, 3, 4 (C5/Z4)

PF2 35 cm sol TLH -> Assise = 20 cm GB3  
 PF3 50 cm sol TLH -> Assise = 16 cm GB3  
 PF4 55 cm sol TLH -> Assise = 12 cm GB3

	PF2	PF3	PF4
	0,35 m sol traité 0,20 m GB3	0,50 m sol traité 0,16 m GB3	0,55 m sol traité 0,12 m GB3

Épaisseur Assise (cm)	20	16 (- 4 cm)	12 (- 8 cm)
CO <sub>2</sub> (kg eq./m <sup>2</sup> )	34	1%	-6%
Energie (MJ/m <sup>2</sup> )	1800	-14%	-24%
Ressources nat. (Sb)	8,9.E <sup>-5</sup>	-13%	-28%
Eau (litres/m <sup>2</sup> )	129	6%	2%
€ / m <sup>2</sup>	77	-11%	-23%



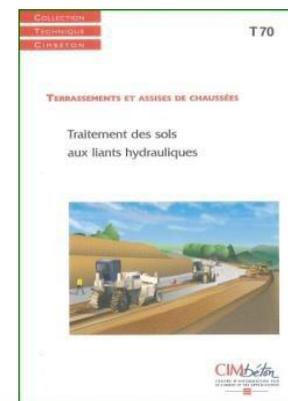


# BIBLIOGRAPHIE



# 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

