

# 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
- EVOLUTIONS
- BILAN ENVIRONNEMENTAL / SIMULATION « PERCEVAL »
- BIBLIOGRAPHIE





# ÉTAT DE L'ART





# MARCHÉ ACTUEL

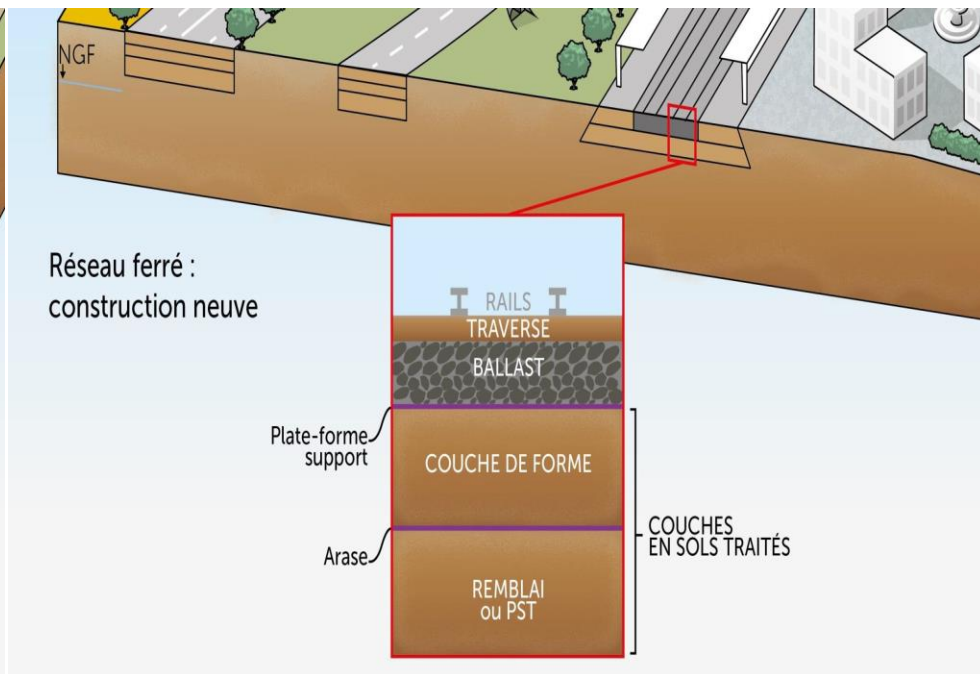
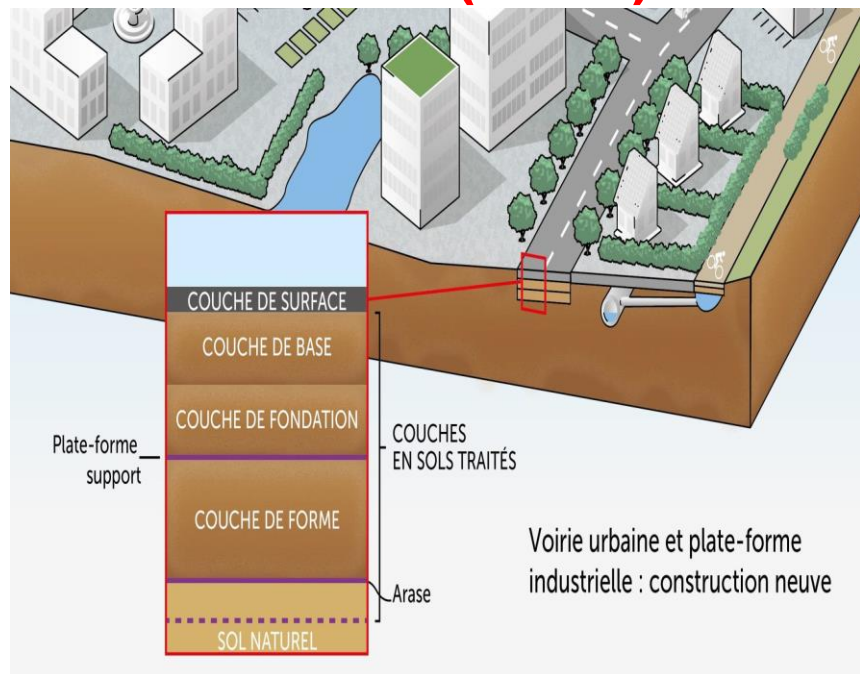
- ❑ **MARCHE EN PLEIN ESSOR** (lié au développement économique)
- ❑ **ENJEUX IMPORTANTS** : 10 à 15 millions de m<sup>2</sup> / an (en France)
- ❑ **TECHNIQUE CODIFIÉE** : guides, normes, DTU...
- ❑ **REALISATION MAÎTRISÉE** : entreprises compétentes, procédés fiables, matériels performants, retours d'expérience...

→ ...mais les **exigences économiques et environnementales** actuelles nécessitent de faire évoluer **la conception et la réalisation** des ouvrages en sols traités, notamment en **augmentant leurs performances mécaniques** de façon à **réduire l'utilisation de matériaux nobles**



# APPLICATIONS

- voies (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).

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

## ❑ INTÉRÊTS : pouvoir utiliser les sols naturels du site =>

- préservation des ressources en matériaux nobles (carrières...),
- diminution des zones de dépôts,
- suppression des transports => plus de 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,
- performances mécaniques plus élevées (PF4),
- meilleure protection vis à vis du gel (à épaisseur égale),
  - + 15% environ pour sol traité LHR
  - + 40% environ pour sable traité LHR

## 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)



# CONSÉQUENCES DU TRAITEMENT

## □ soit « AMÉLIORATION »

accroissement, TEMPORAIRE, des caractéristiques géotechniques => concerne essentiellement les sols trop humides

→ **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**

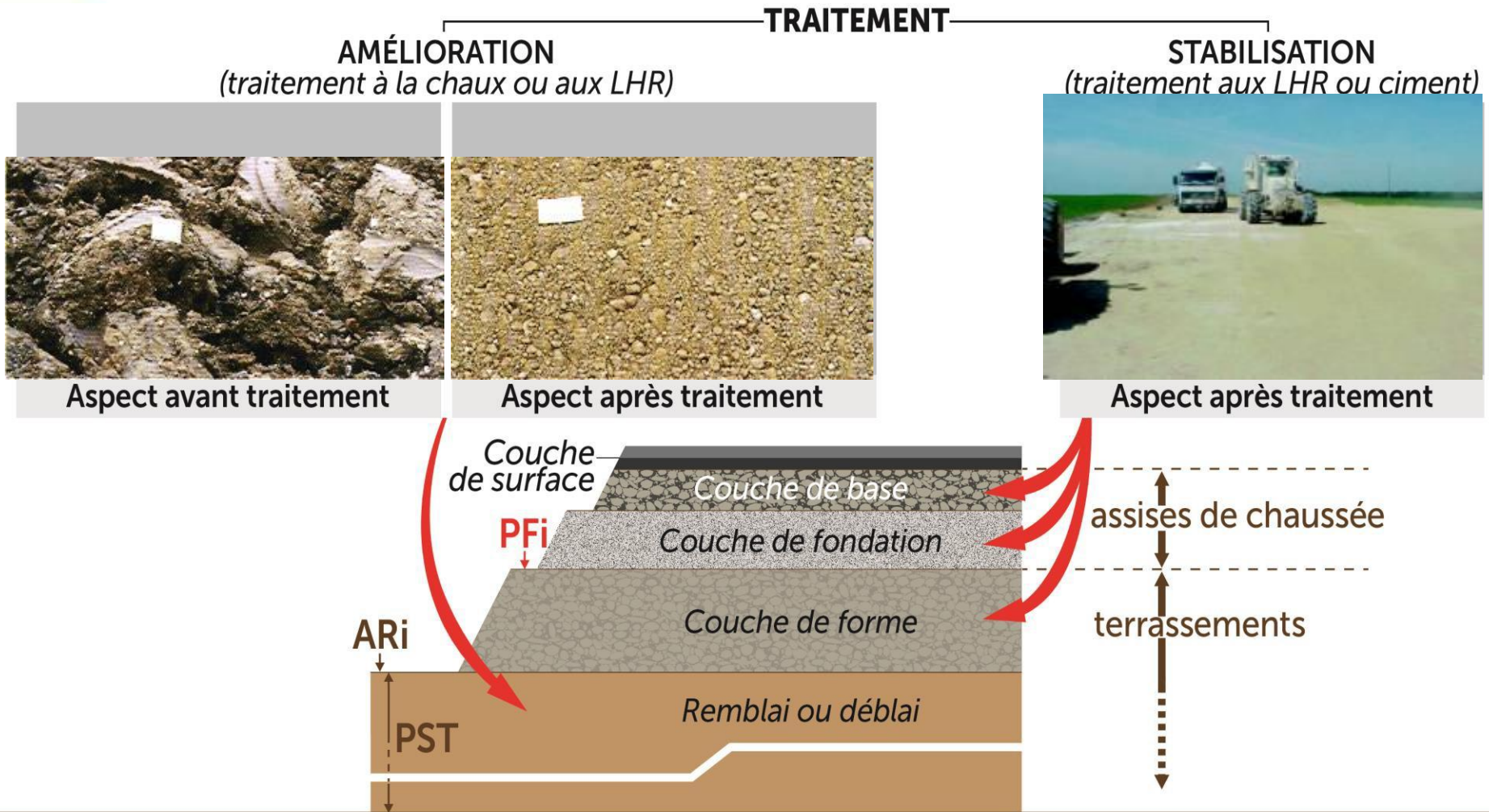
(exigées pour le dimensionnement) :

- 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





# 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 (K), laitier HF (S), CaO, CV (V), fillers calcaires (L), pouzzolane (P), schistes calcinés (T)... en proportions variables suivant les objectifs recherchés
- **classes de résistances** (à 56 jours) : 2,5 / 12,5 / 22,5 / 32,5 MPa
- **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.

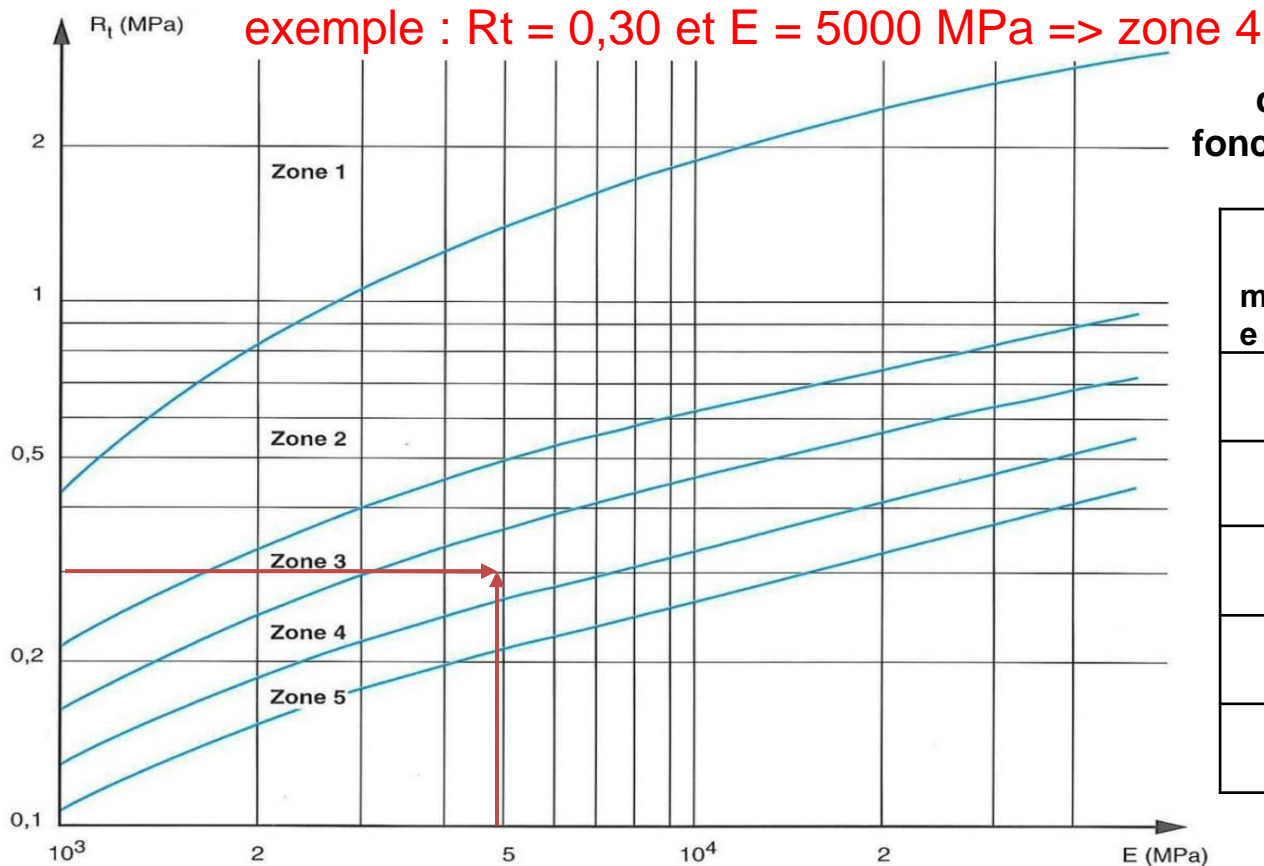


# ÉTUDES DE FORMULATION

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 « $R_t / E$ » - 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)

EPAISSEUR (cm) en fonction de la classe mécanique  
(et de la classe d'arase)

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)

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

### ■ Selon GTS

Classes de sols	dosages préconisés pour PF2
(C) - A1- B5	1 % CaO + 7 % CEM 32.5
(C) – A2 – B6	1,5 % CaO + 7 % CEM 32.5
(C) – A3	2 % CaO + 7 % CEM 32.5 ou 6 % CaO
(C) – B3 – B4 et D2 – D3	5 % CEM 32.5

### ■ 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).*

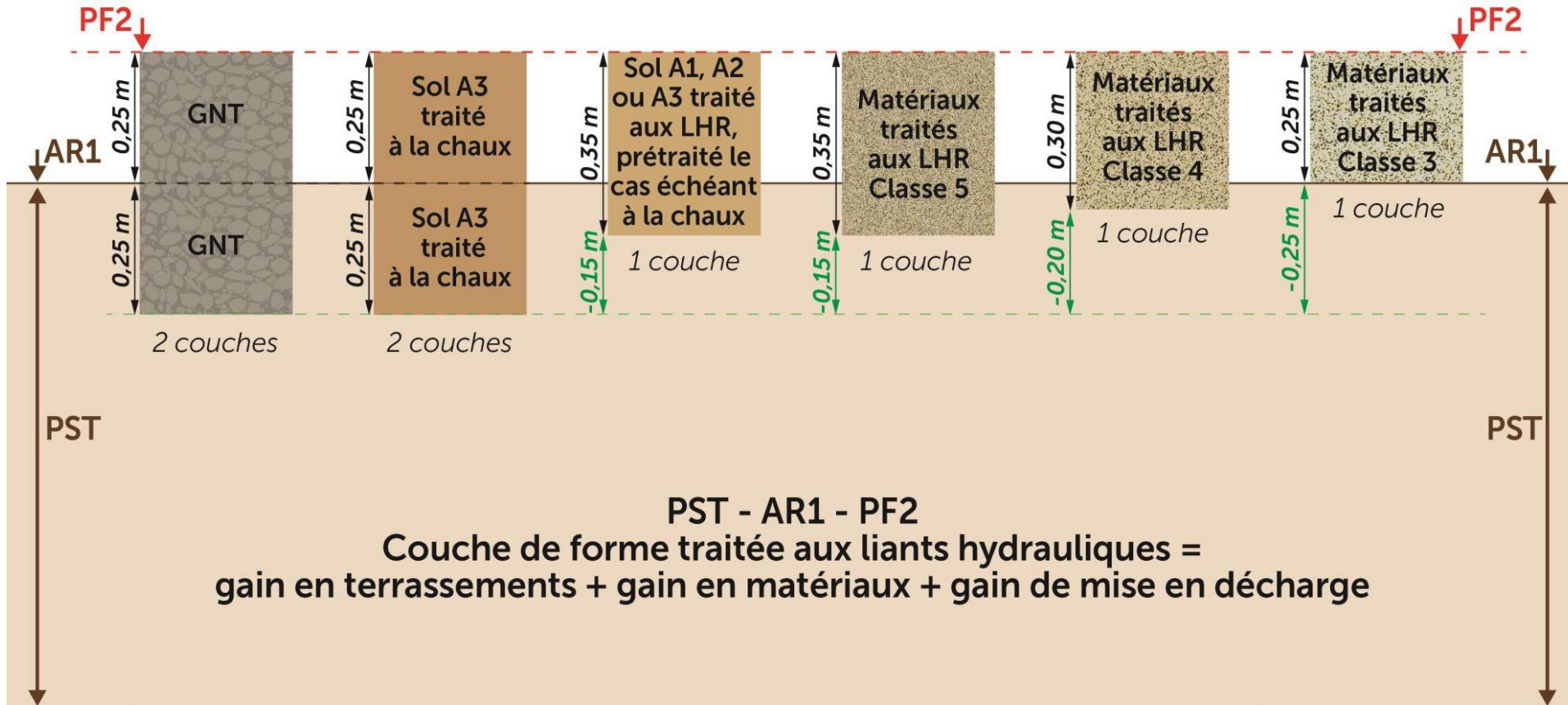
*Une note d'information « IDRRIM », validant ses conclusions, est en cours de publication.*



# DIMENSIONNEMENT "COUCHE DE FORME" (4)

## PF2 sur AR1

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



**PST - AR1 - PF2**  
**Couche de forme traitée aux liants hydrauliques =**  
**gain en terrassements + gain en matériaux + gain de mise en décharge**

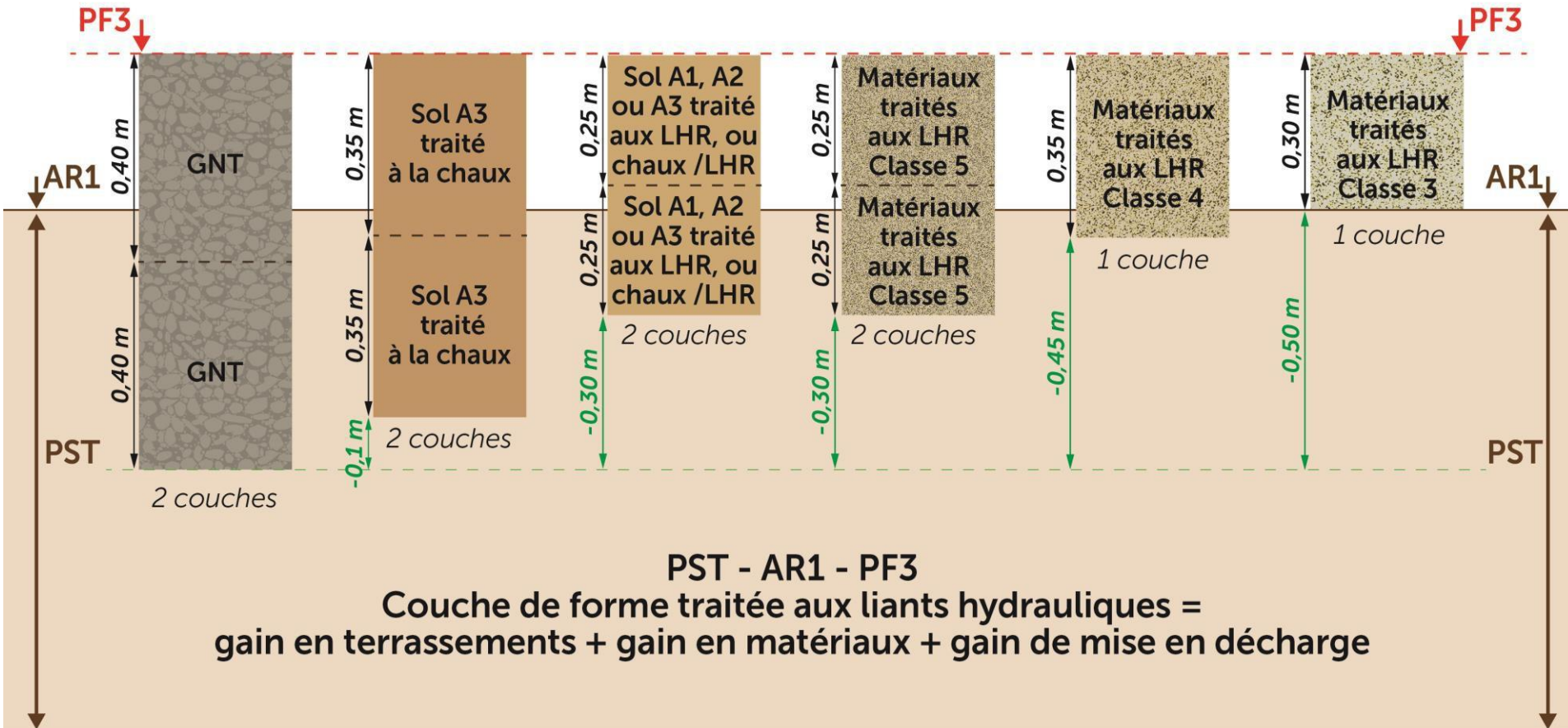


# DIMENSIONNEMENT "COUCHE DE FORME" (5)

## PF3 sur AR1

**0,80 m GNT =**

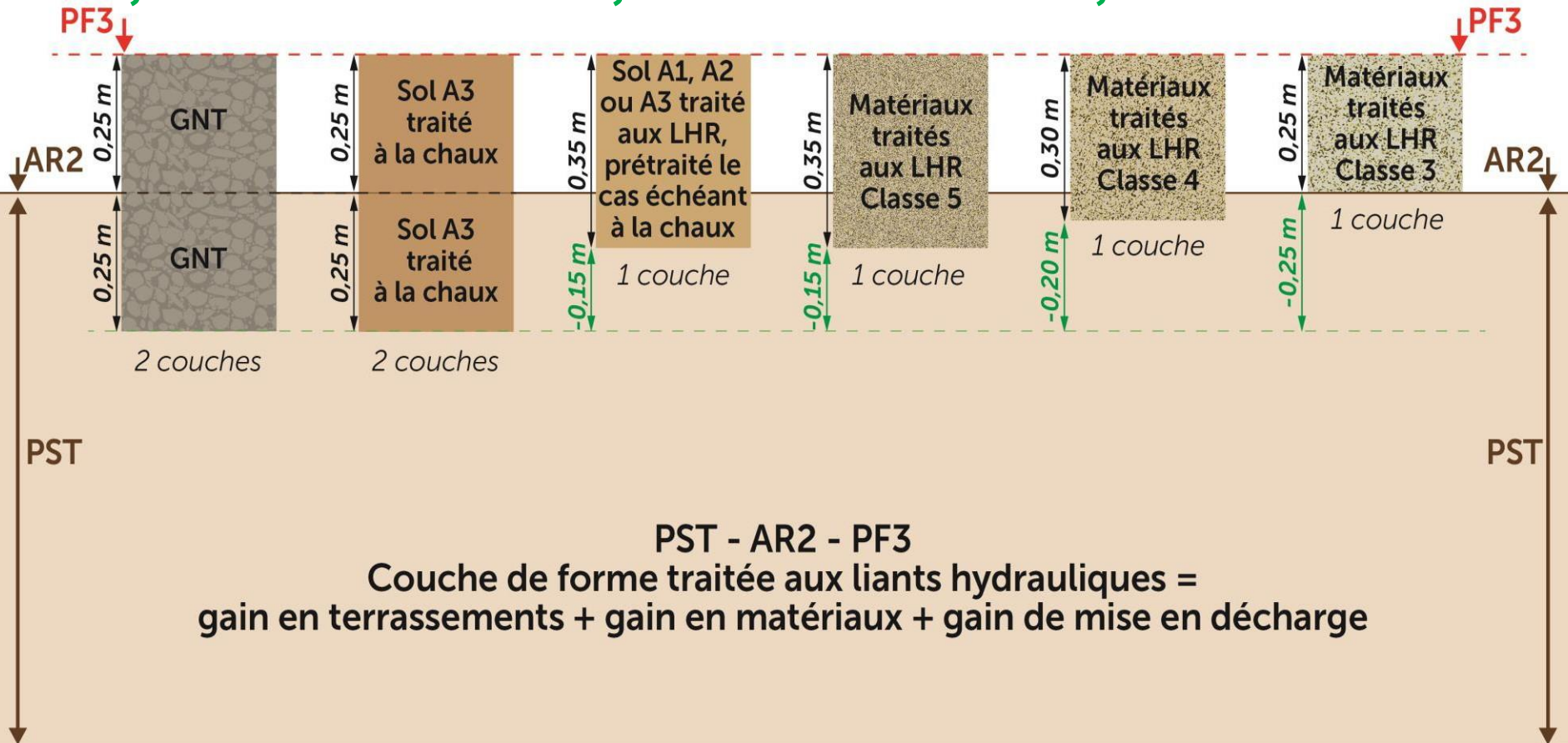
**0,50 m « C5/Z4 » ou 0,35 m « C4/Z3 » ou 0,30 m « C3/Z2 »**



# DIMENSIONNEMENT "COUCHE DE FORME" (6)

## PF3 sur AR2

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



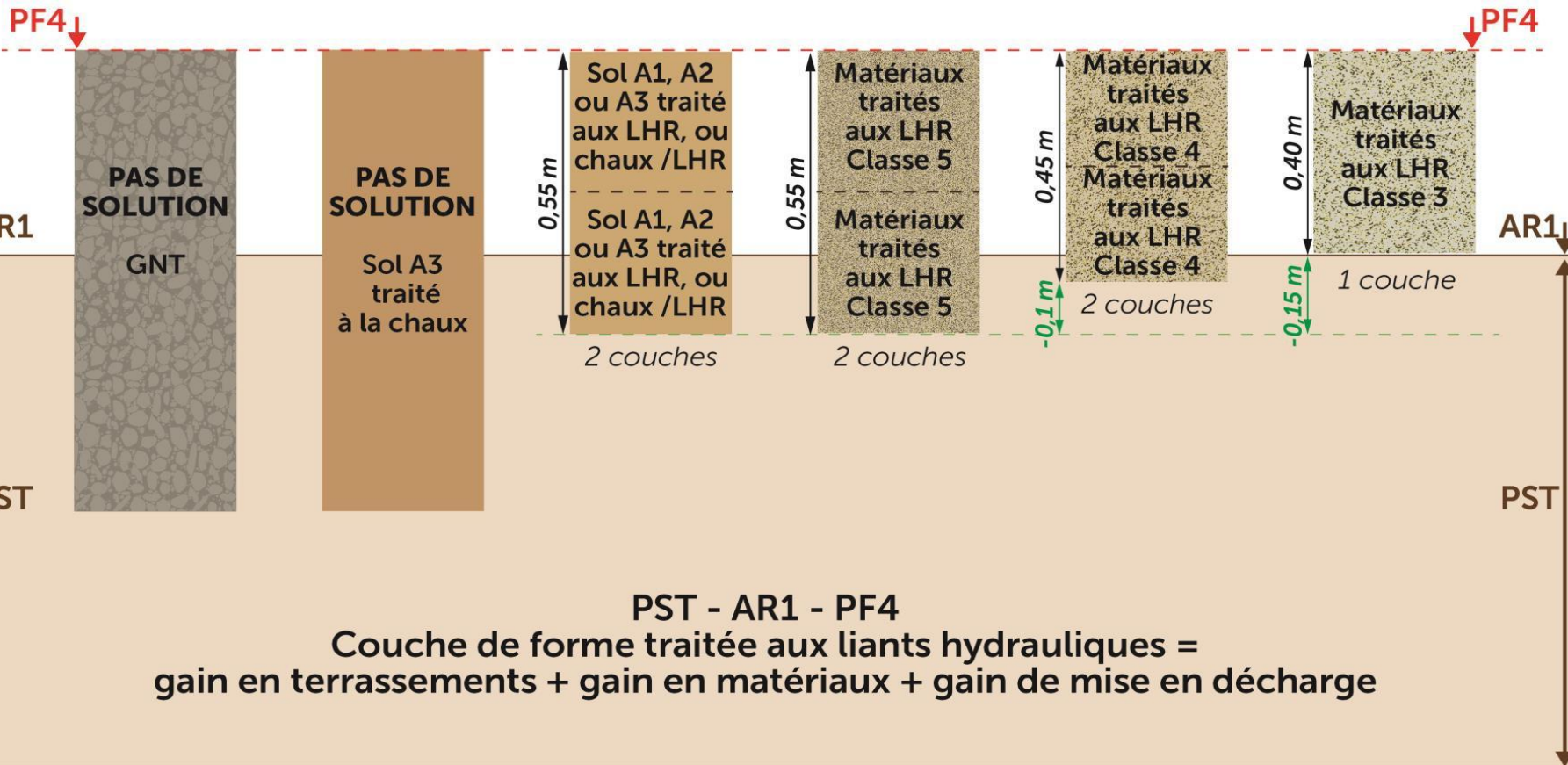
**PST - AR2 - PF3**  
**Couche de forme traitée aux liants hydrauliques =**  
**gain en terrassements + gain en matériaux + gain de mise en décharge**

# DIMENSIONNEMENT "COUCHE DE FORME" (7)

## PF4 sur AR1

GNT = IMPOSSIBLE

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



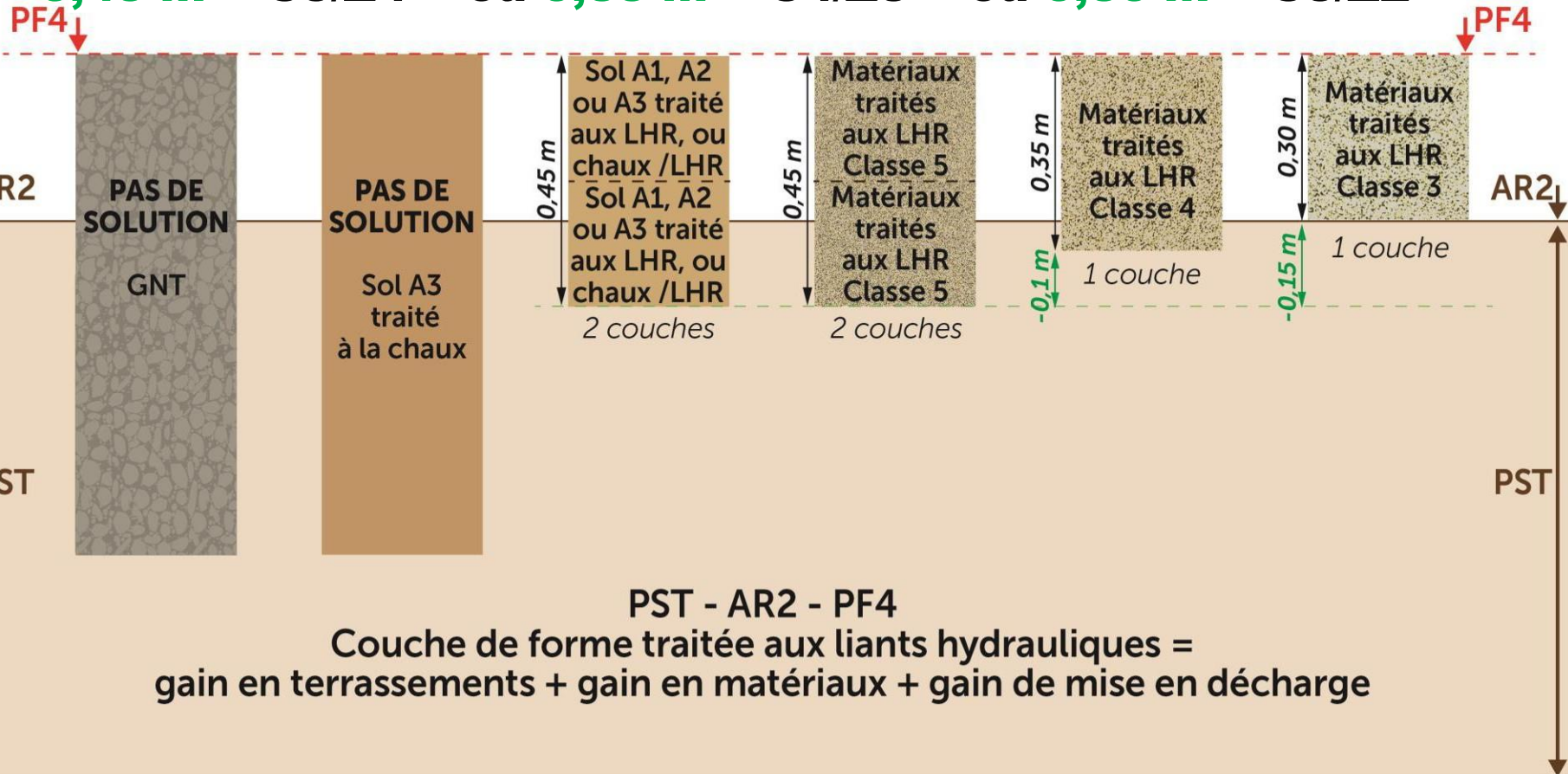
PST - AR1 - PF4  
Couche de forme traitée aux liants hydrauliques =  
gain en terrassements + gain en matériaux + gain de mise en décharge

# DIMENSIONNEMENT "COUCHE DE FORME" (8)

## PF4 sur AR2

GNT = IMPOSSIBLE

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





# 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 :

- 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



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).

## □ MATÉRIELS :

- niveleuse
- raboteuse

## □ RÉALISATION : ENLÈVEMENT DES MATÉRIAUX

- 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



Gammadensimètre



Déflectographe « Iacroix »



Portancemètre



# ÉVOLUTIONS TECHNIQUES





# ÉVOLUTIONS TECHNIQUES (1)

## □ ENJEUX ET OBJECTIFS :

- dans le passé on optimisait les structures d'assises, indépendamment et au détriment du support « terrassements »  
On parlait d'une plate-forme « minimum » (PF2) et les couches d'assises étaient dimensionnées pour supporter l'essentiel des surcharges (trafic)
- pour des raisons environnementales et économiques, il est nécessaire de réduire l'apport (= transport) de matériaux nobles (= graves concassées, bitume..).  
Les matériaux « naturels » du site traités représentent la meilleure alternative.





## ÉVOLUTION TECHNIQUE (2)

### □ MOYENS :

augmenter les performances mécaniques des matériaux traités, notamment au niveau des plate-formes (valorisation en PF3 ou PF4) voire même à utiliser des sols traités **en assises de chaussées** (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 (3)

CONCEPTION « CLASSIQUE »	CONCEPTION ACTUELLE
prépondérance des couches d'assises qui « supportent » l'essentiel des surcharges (trafic)	valorisation du « support » (AR / PF) => meilleure répartition des surcharges (trafic) entre support et couches d'assises
graves concassées, bitume, ciment, EME..	sols naturels du site traités à la chaux et/ou au LH
sollicitation plus faible du support « terrassements » (couche de forme, PST...) => moindre nécessité de les valoriser	<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>
Importance :	réduction :
<ul style="list-style-type: none"> <li>• matériaux « nobles »</li> <li>• transport</li> <li>• matériaux mis en dépôt</li> </ul>	



# SIMULATION « PERCEVAL »

## INTERÊT DES PF3 ET PF4 DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES

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

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

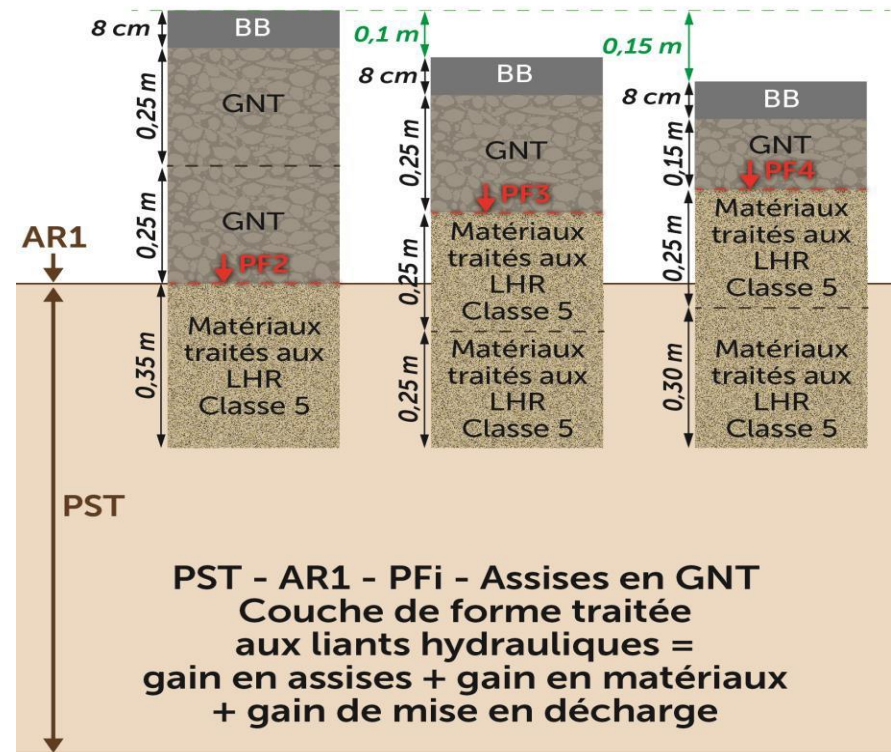


# INTERÊT DES PF3 ET PF4 (1)

## DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES

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

# INTERÊT DES PF3 ET PF4 (2)

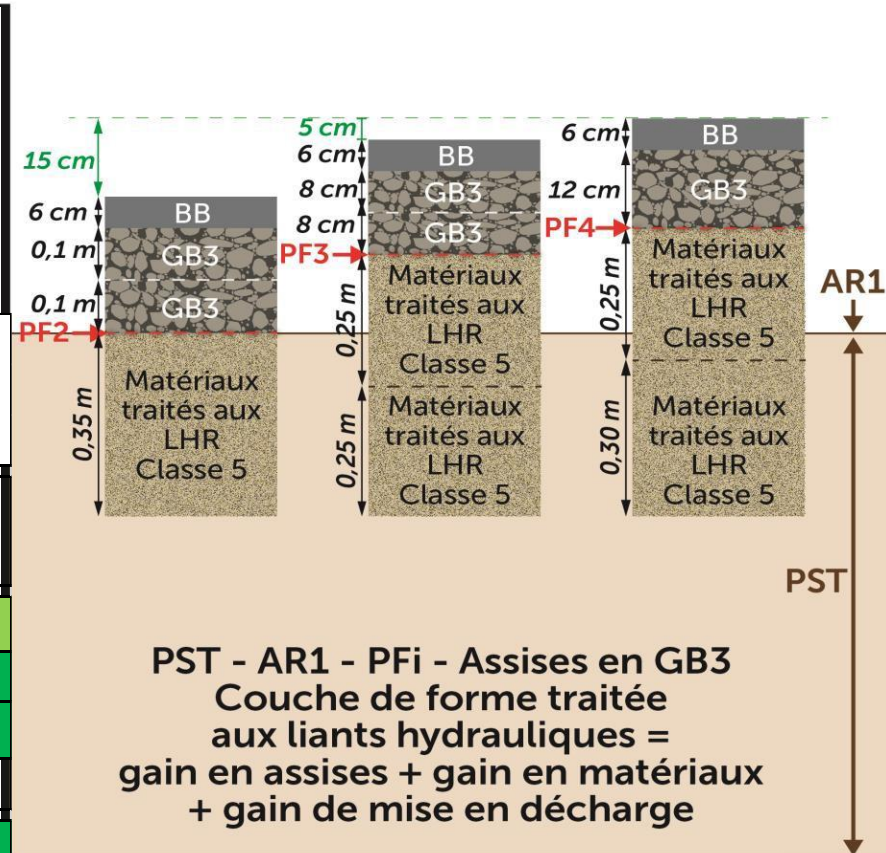
## DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES

### 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%
Énergie (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%



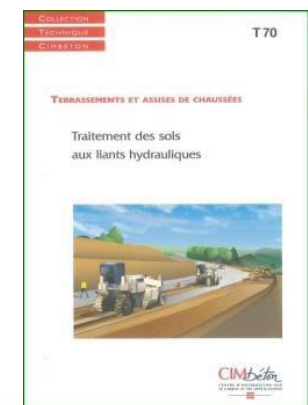
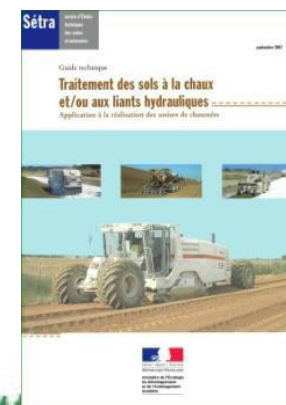


# BIBLIOGRAPHIE



# 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

