

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

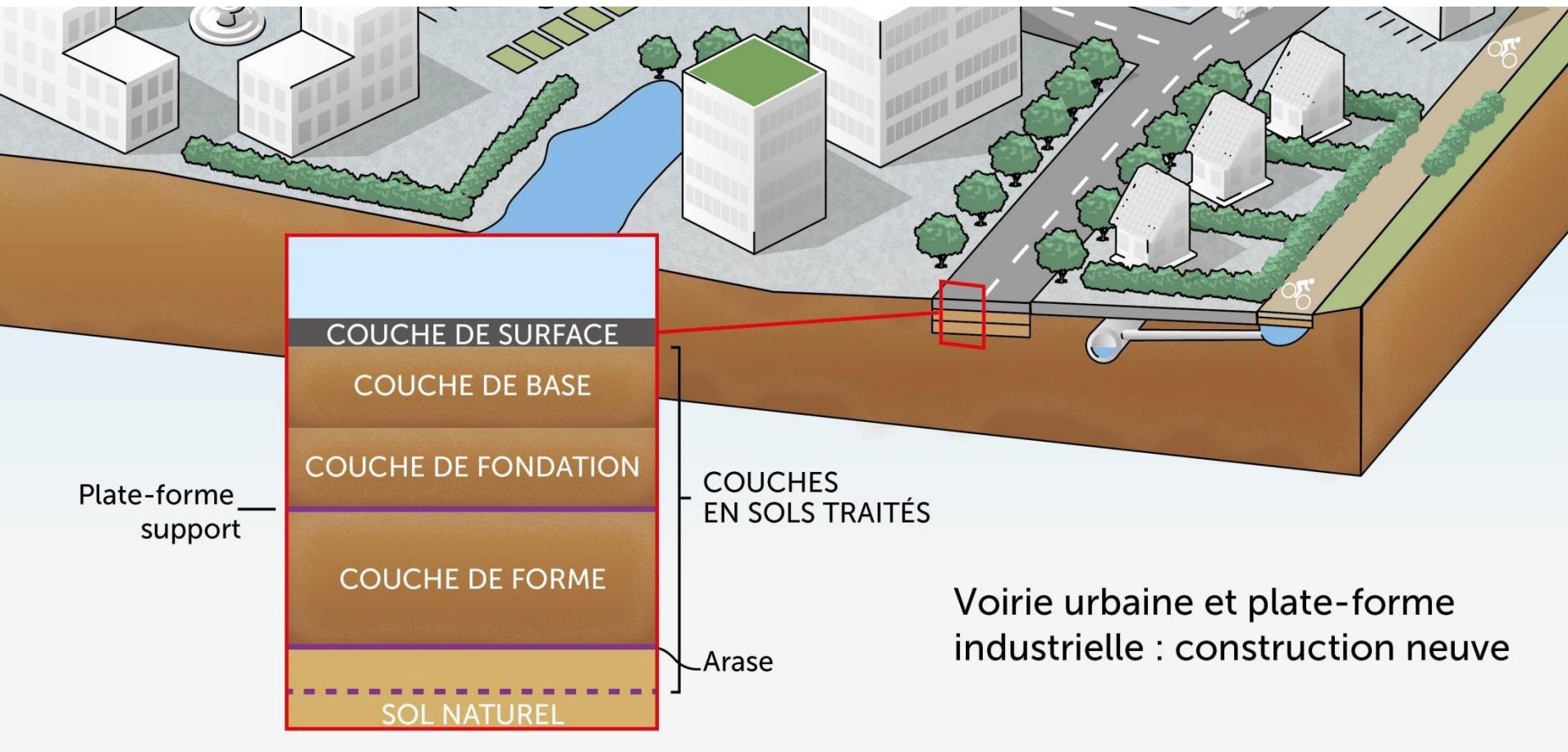
- Mise en œuvre plus « technique »,
- Mise en œuvre tributaire des conditions météorologiques (pluie, vent, gel..)
- Délais à respecter pour :
 - avoir une résistance suffisante pour pouvoir circuler
 - bénéficier de l'insensibilité à l'eau et au gel.
- Fissuration : risque faible (module faible)



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

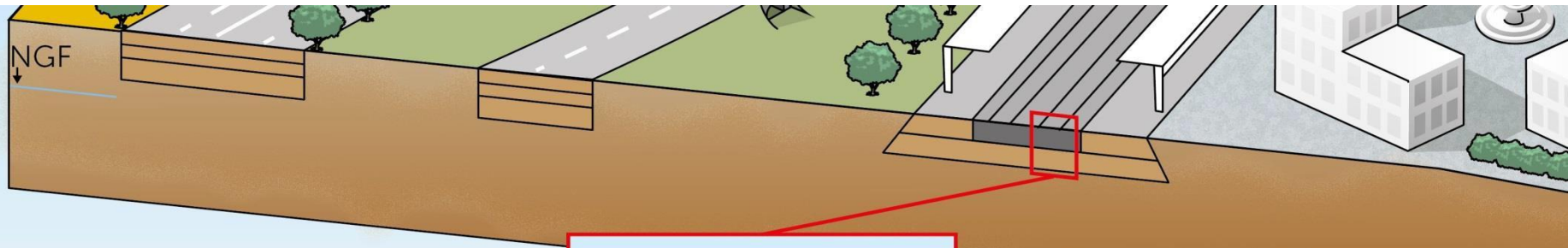
APPLICATIONS

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

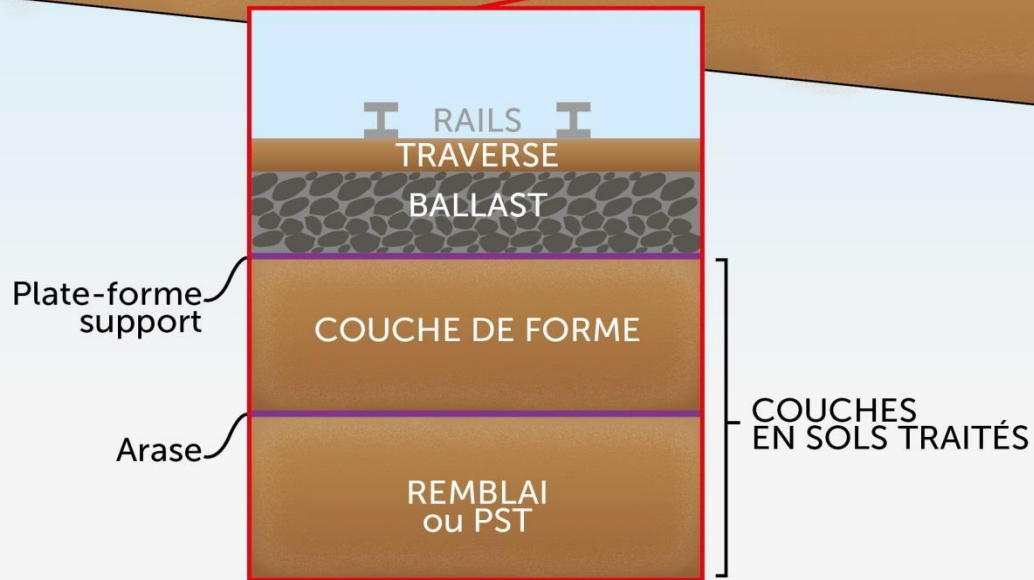


APPLICATIONS

Voies ferrées (LGV.....)



Réseau ferré :
construction neuve



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 »

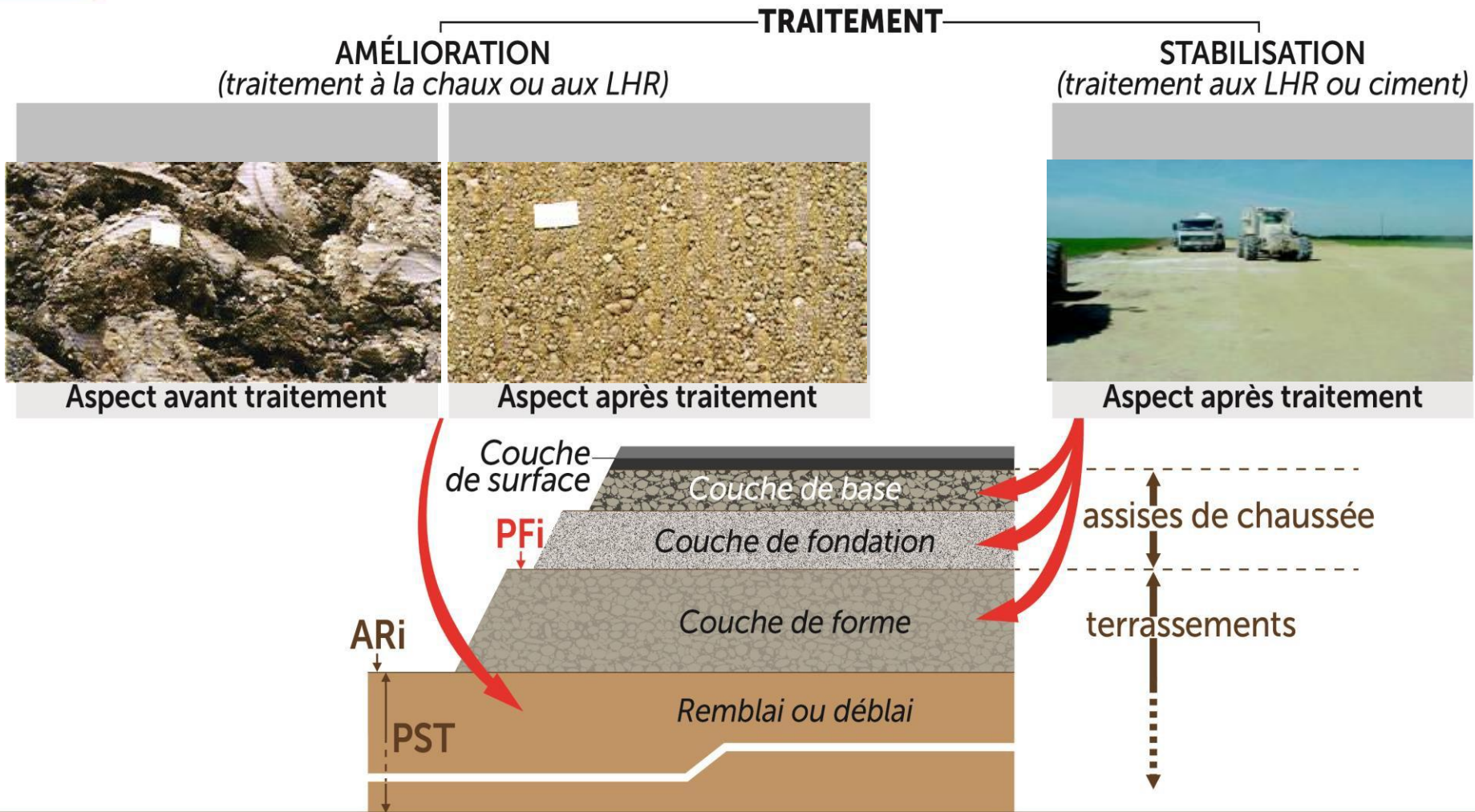
accroissement, PÉRENNE, des caractéristiques géotechniques et mécaniques.

→ **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





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 Gv% et résistance Rit).
- **Intérêt** : réponse rapide, moins de 2 semaines (essais à 40°).
- **Limite** : résultats mécaniques non utilisables pour le dimensionnement.



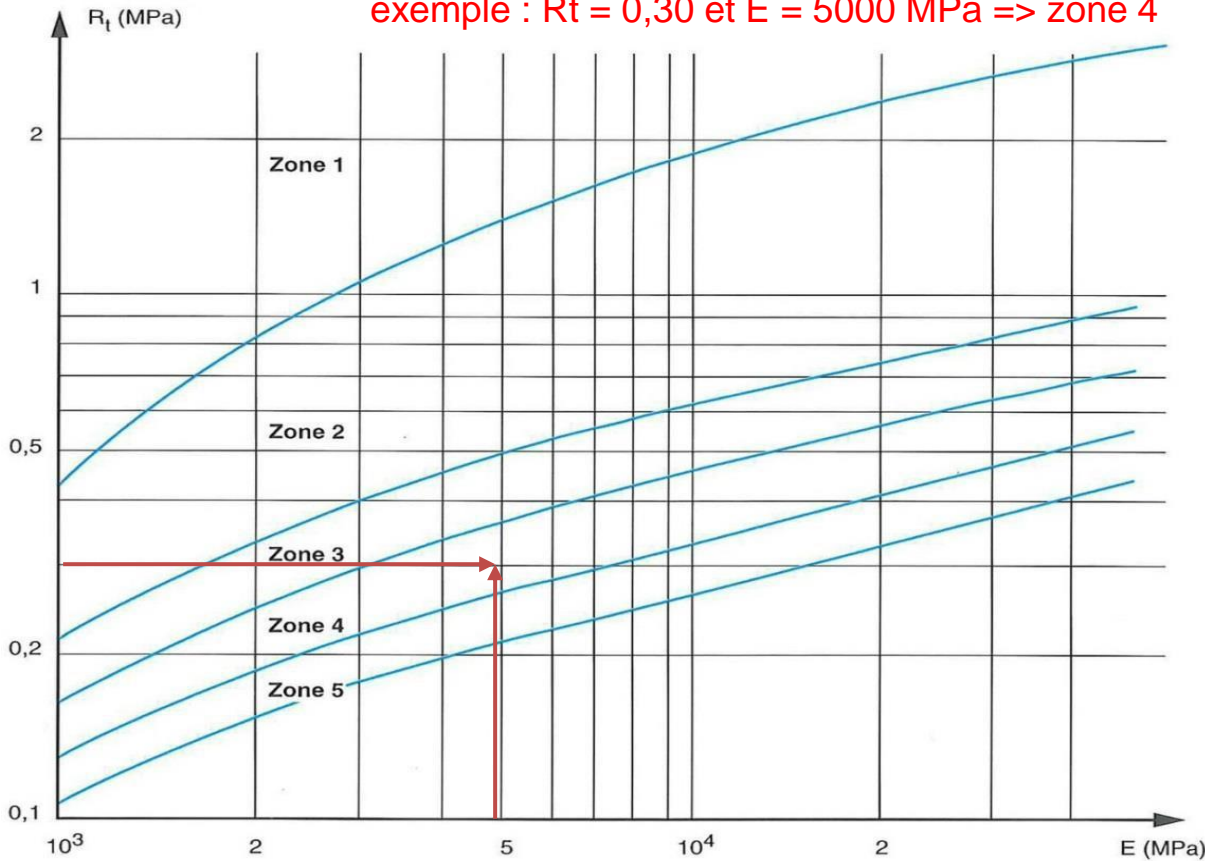
ÉTUDES DE FORMULATION

Niveaux des Etudes		Nature de l'ouvrage	
Caractéristiques		PST / remblais 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	$CBR_i (4 \text{ j}) > IPI$	$R_{c-im} (28+32) / R_c (\text{à } 60 \text{ j}) :$ - 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)
Niveau 2	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"> R22, R42, R62, B41, R11 C1 ou C2 (B21, B41, B51) (après élimination de la fraction grossière et de la fraction 0/d)		<ul style="list-style-type: none"> Sols argilo-limoneux (A1, A2, A3) et sablo-limoneux (B4, B5, B6) traités au liant hydraulique (ciment ou LHR), éventuellement prétraités à la chaux. Sols grenus propres traités aux liants hydrauliques 				
	<ul style="list-style-type: none"> R21, R41, R61, D31 C1 ou C2 (B11, B31) (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						
	AR2 EV2 > 50 MPa – insensible à l'eau	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	0,70 m*	0,50 m*	0,35 m	0,30 m	PF3
		PST2 - 0,80 m**					
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	

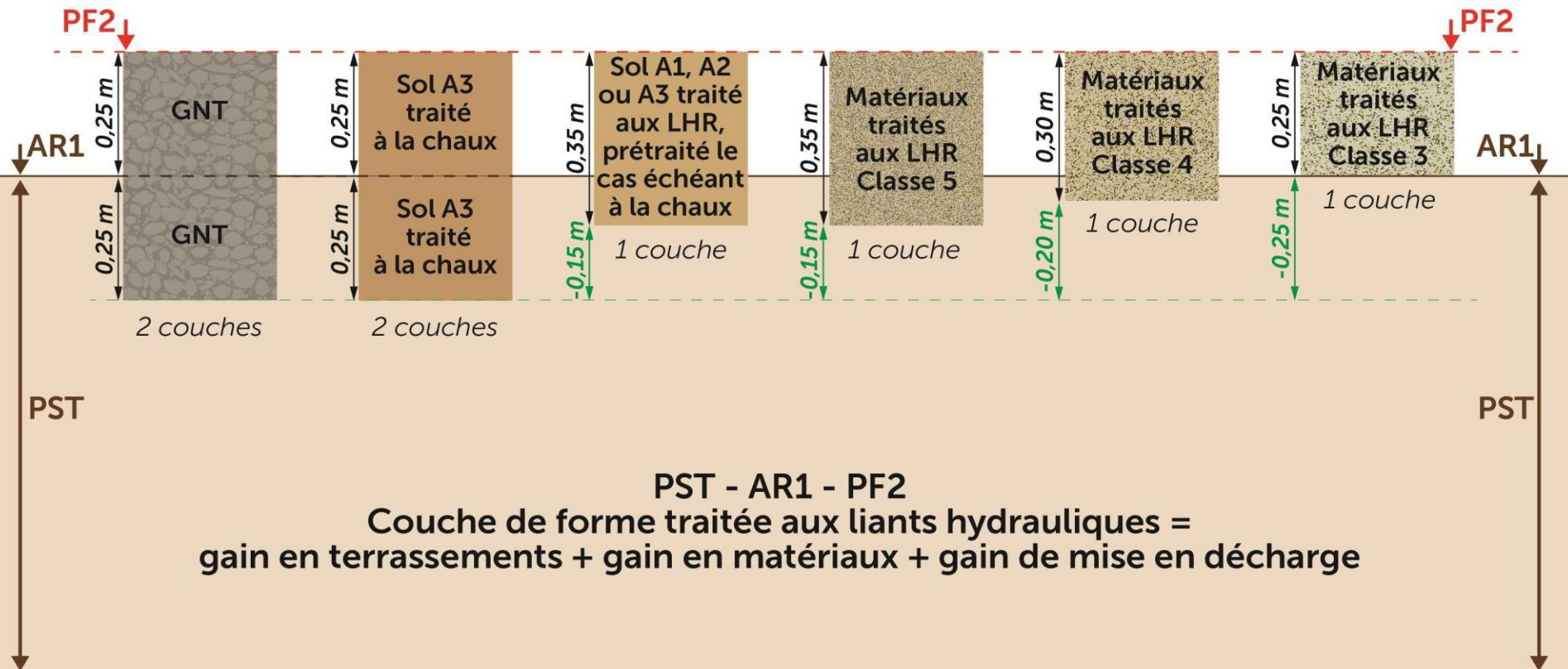
* : traitement en 2 couches

** : 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

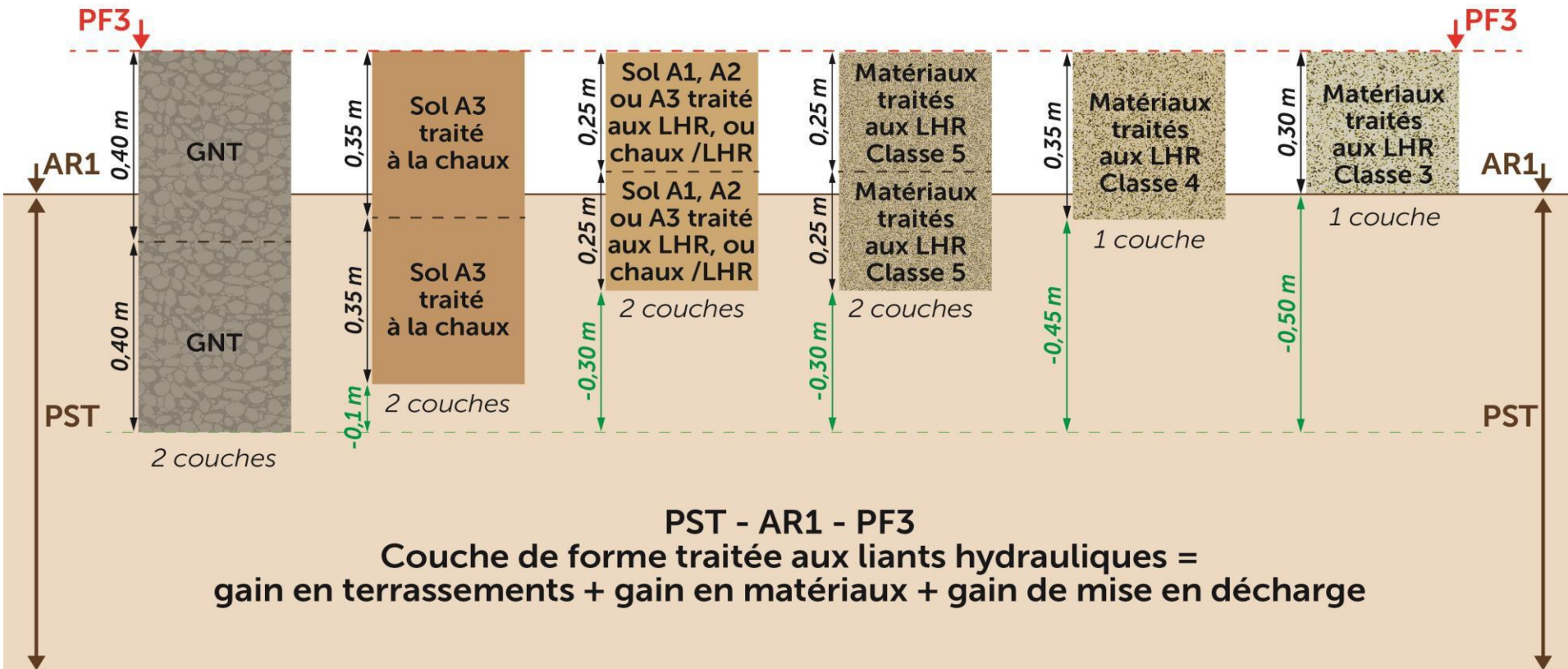
0,50 m GNT =
0,35 m « C5/Z4 » ou 0,30 m « C4/Z3 » ou 0,25 m « C3/Z2 »



DIMENSIONNEMENT COUCHE DE FORME (4)

PF3 sur AR1

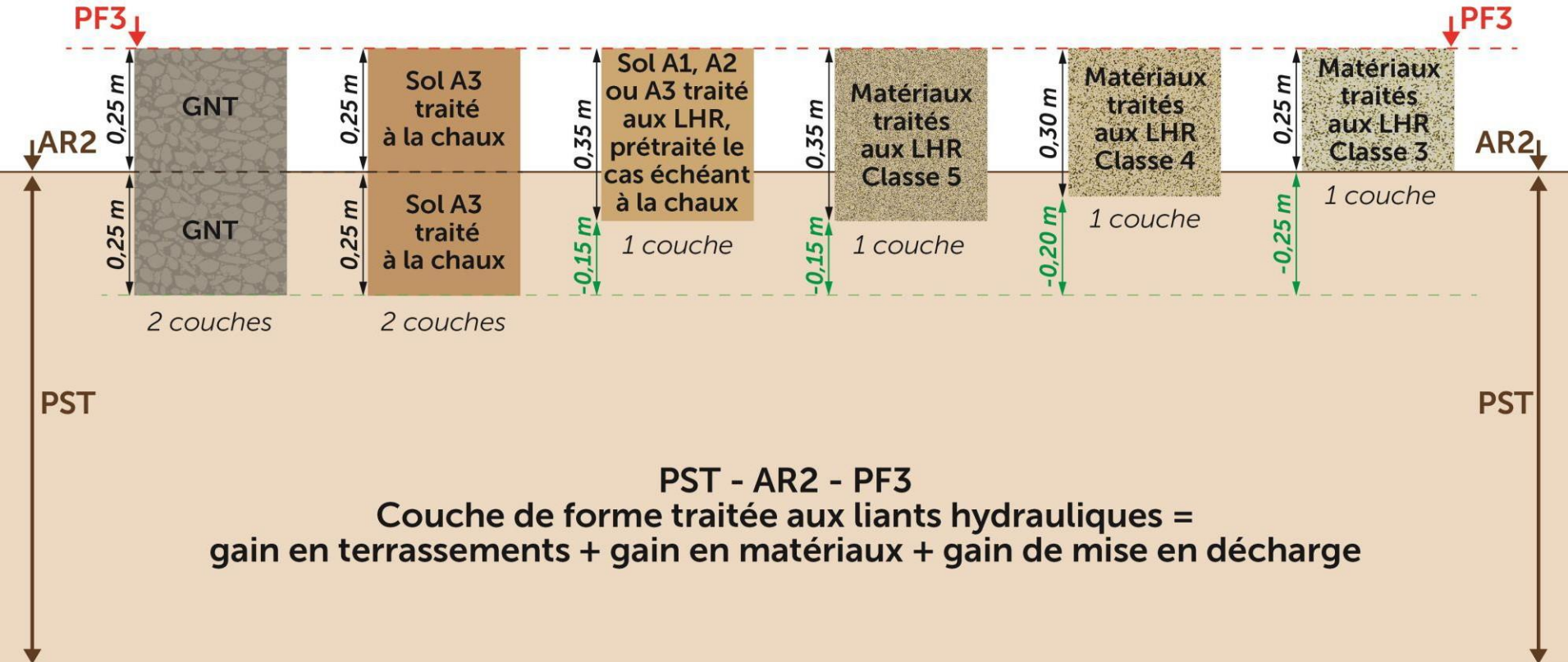
0,80 m GNT =
0,50 m « C5/Z4 » ou 0,35 m « C4/Z3 » ou 0,30 m « C3/Z2 »



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 »



PST - AR2 - PF3

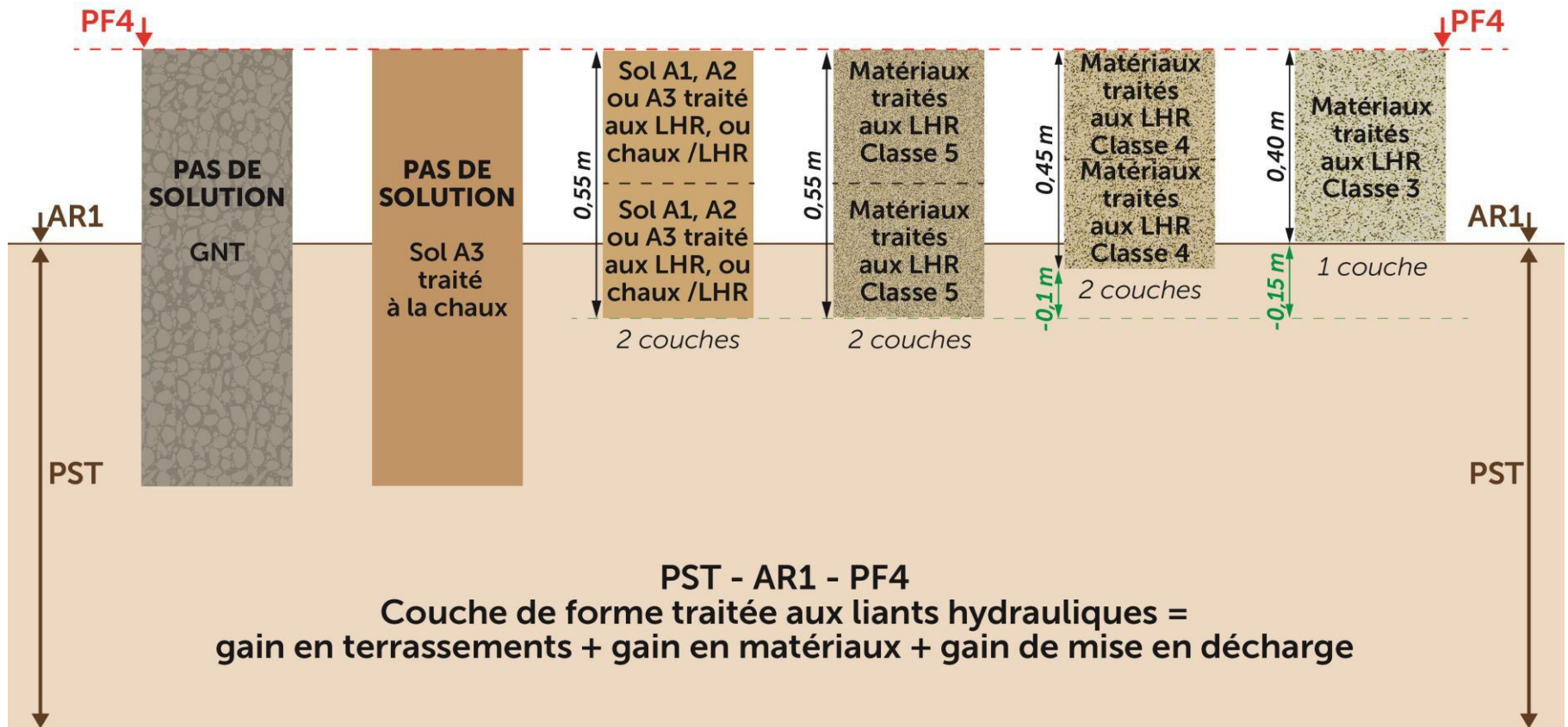
Couche de forme traitée aux liants hydrauliques =
gain en terrassements + gain en matériaux + gain de mise en décharge

DIMENSIONNEMENT COUCHE DE FORME (6)

PF4 sur AR1

GNT = IMPOSSIBLE

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

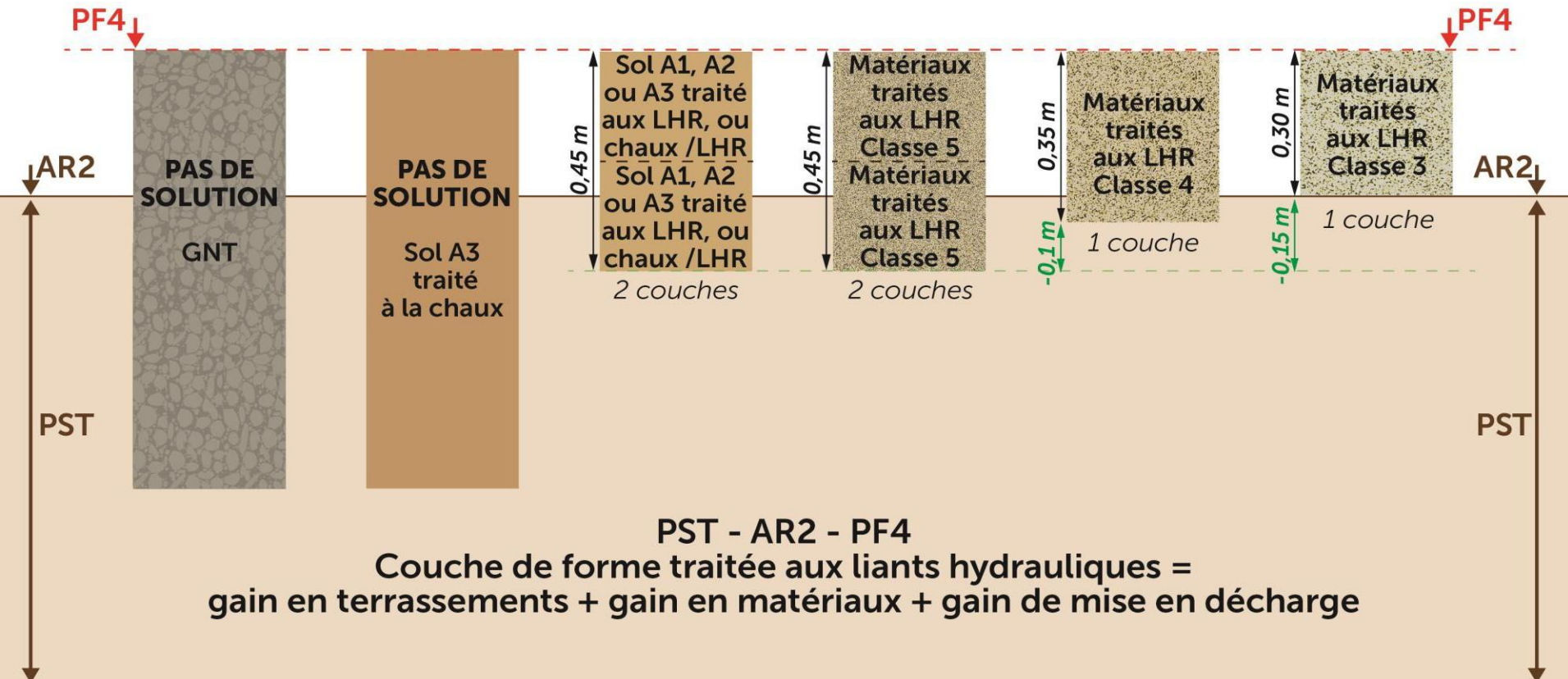


DIMENSIONNEMENT COUCHE DE FORME (7)

PF4 sur AR2

GNT = IMPOSSIBLE

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



PST - AR2 - PF4

Couche de forme traitée aux liants hydrauliques = gain en terrassements + gain en matériaux + gain de mise en décharge

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 :

- 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



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



Gammadensimètre



Déflectographe « Iacroix »



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 m² / 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)

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



SIMULATION « PERCEVAL »

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES INTERÊT DES PF3 ET PF4

www.infociments.fr

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

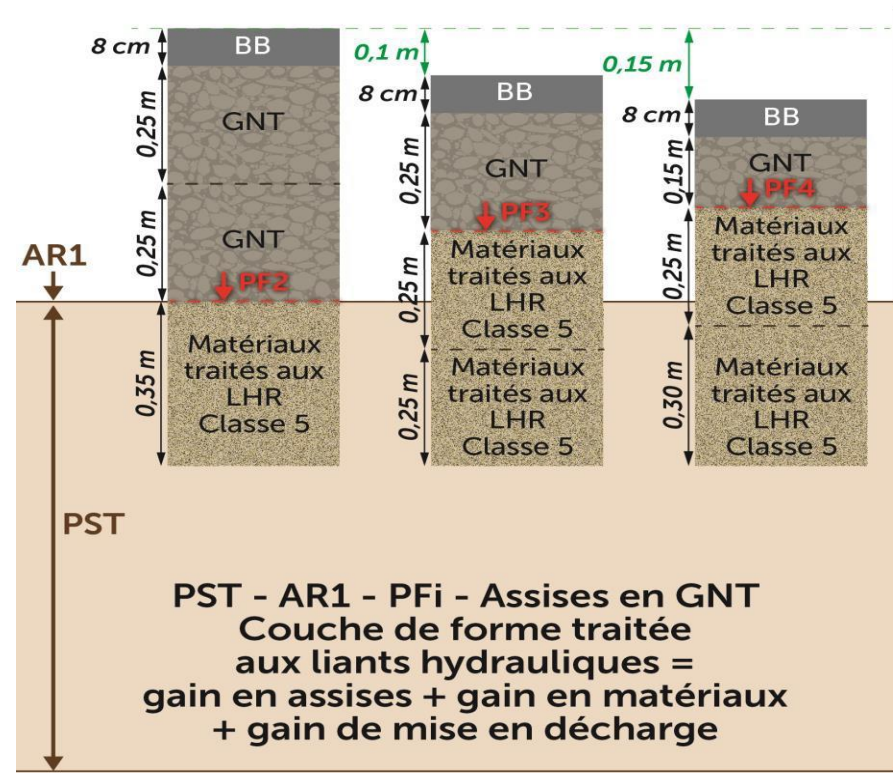


DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES (1)

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)
CO₂ (kg eq./m²)	22	3%	3%
Energie (MJ/m²)	715	-7%	-9%
Ressources nat. (Sb)	4,2.E ⁻⁵	-19%	-26%
Eau (litres/m²)	111	-0,5%	-2,1%
€ / m²	67	-29%	-40%

DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES (1)

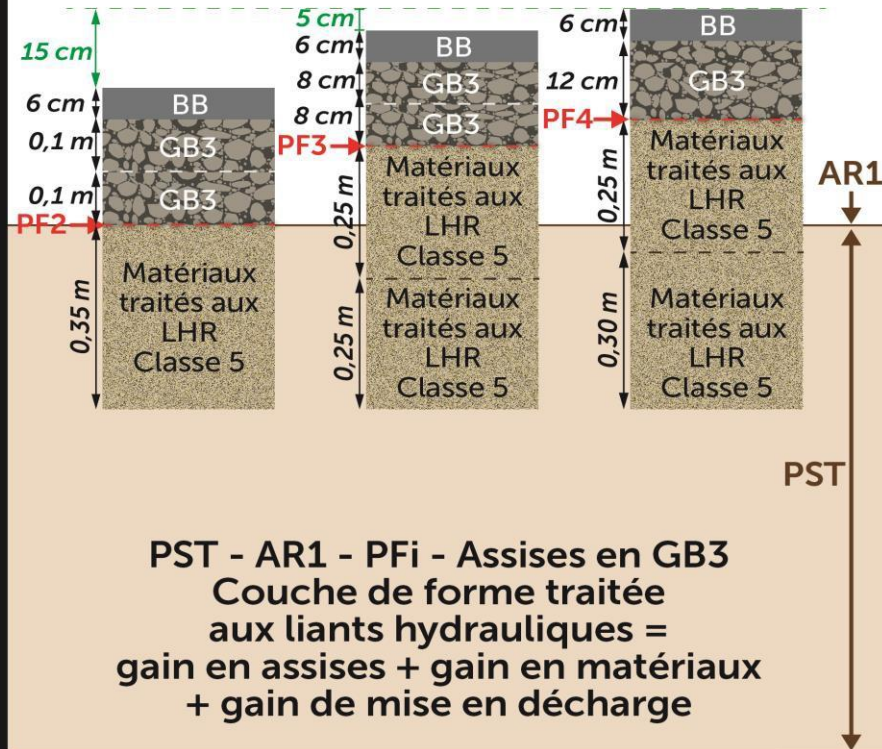
INTERÊT DES PF3 ET PF4

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 ₂ (kg eq./m ²)	34	1%	-6%
Énergie (MJ/m ²)	1800	-14%	-24%
Ressources nat. (Sb)	8,9.E ⁻⁵	-13%	-28%
Eau (litres/m ²)	129	6%	2%
€ / m ²	77	-11%	-23%



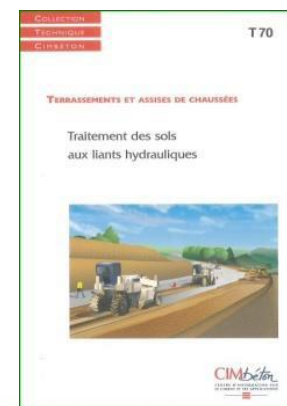


BIBLIOGRAPHIE



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

