

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

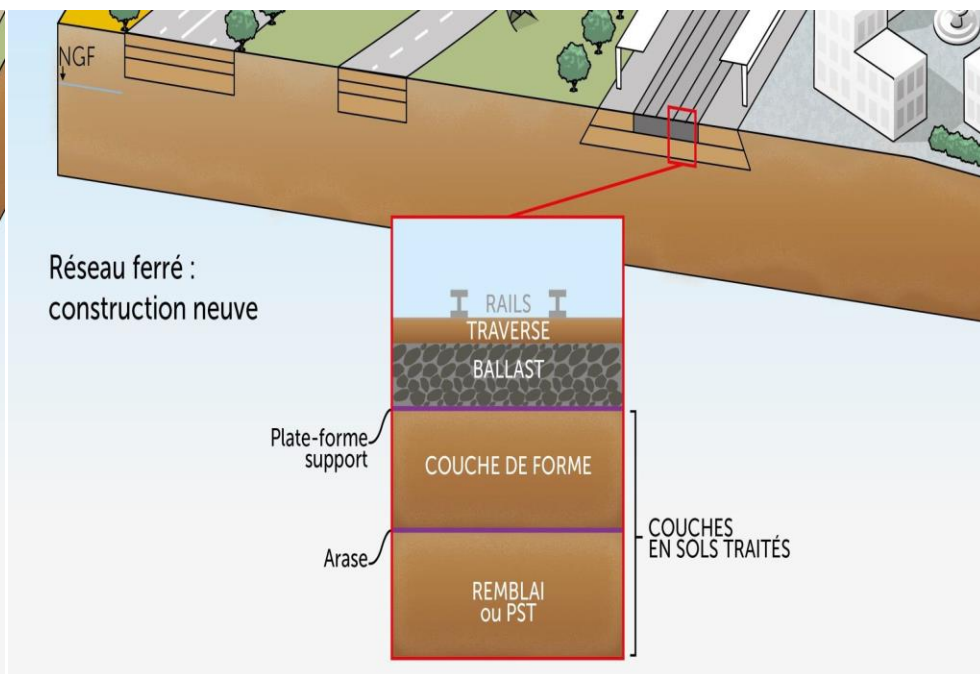
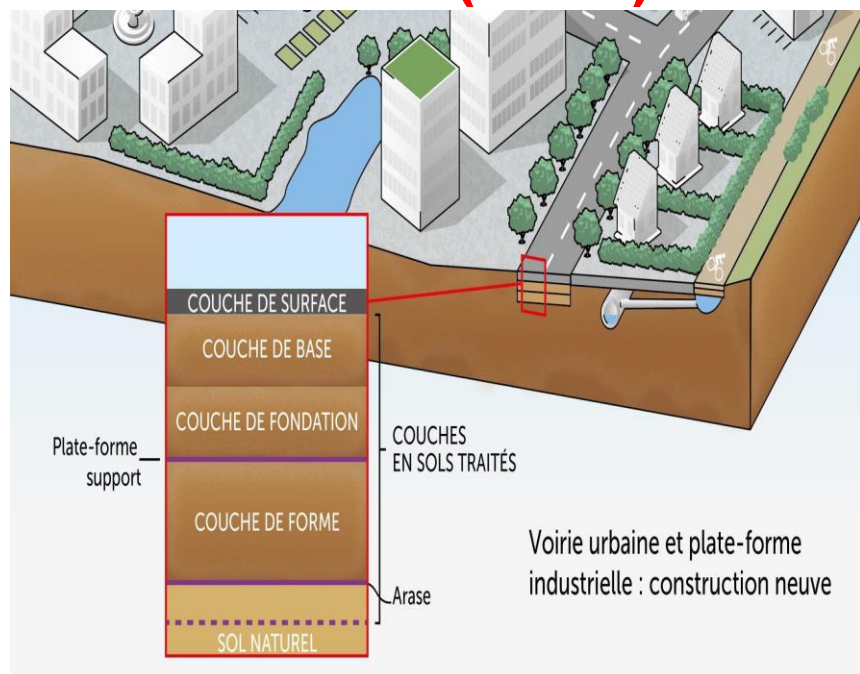
- ❑ **MARCHE EN PLEIN ESSOR** (lié au développement économique)
- ❑ **ENJEUX IMPORTANTS** : 10 à 15 millions de m² / an (en France)
- ❑ **TECHNIQUE CODIFIÉE** : guides, normes, DTU...
- ❑ **REALISATION MAÎTRISÉE** : entreprises compétentes, procédés fiables, matériels performants, retours d'expérience...

→ ...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)



Épaisseurs 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**

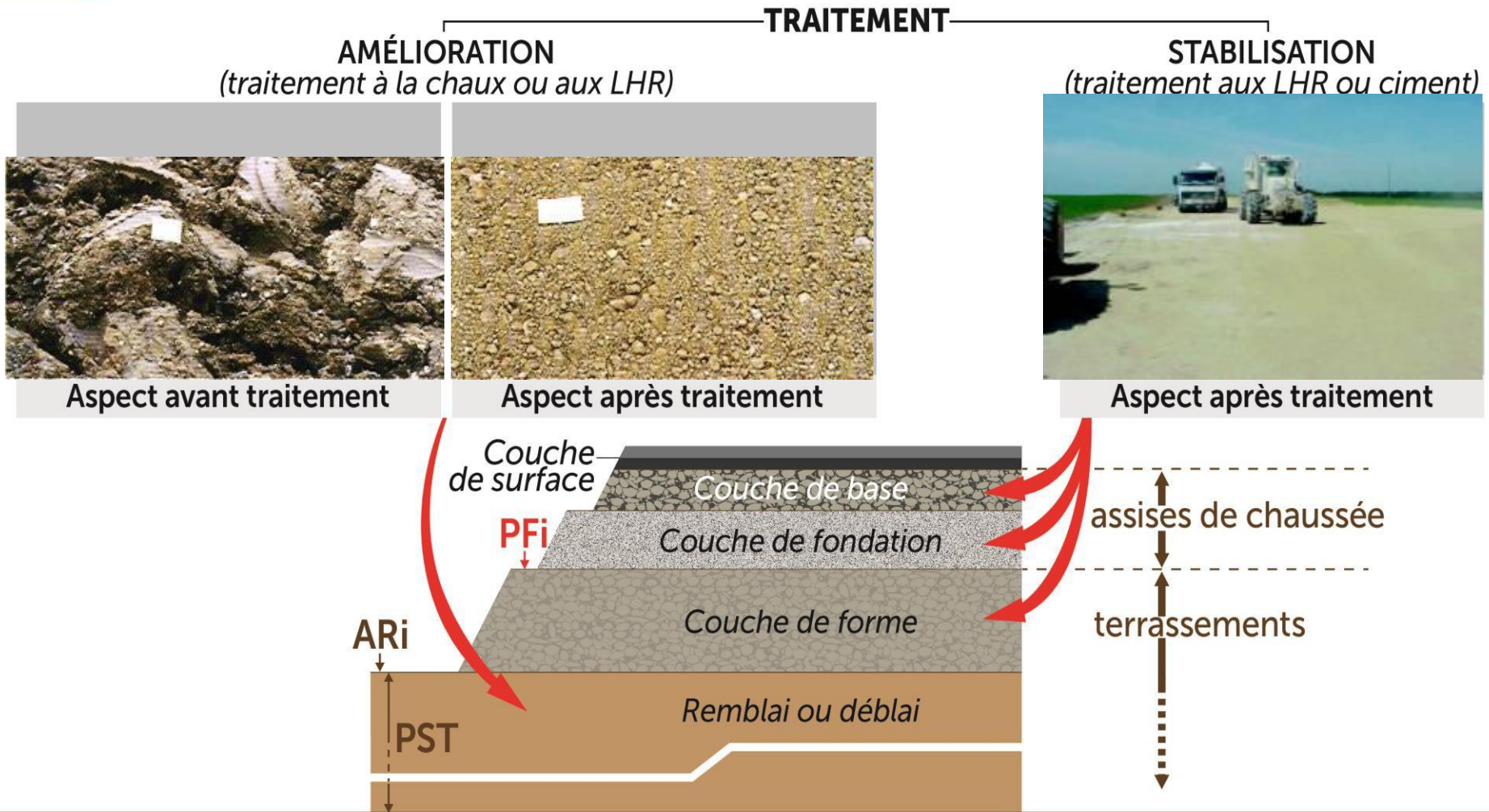
(exigées pour le dimensionnement) :

- 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.

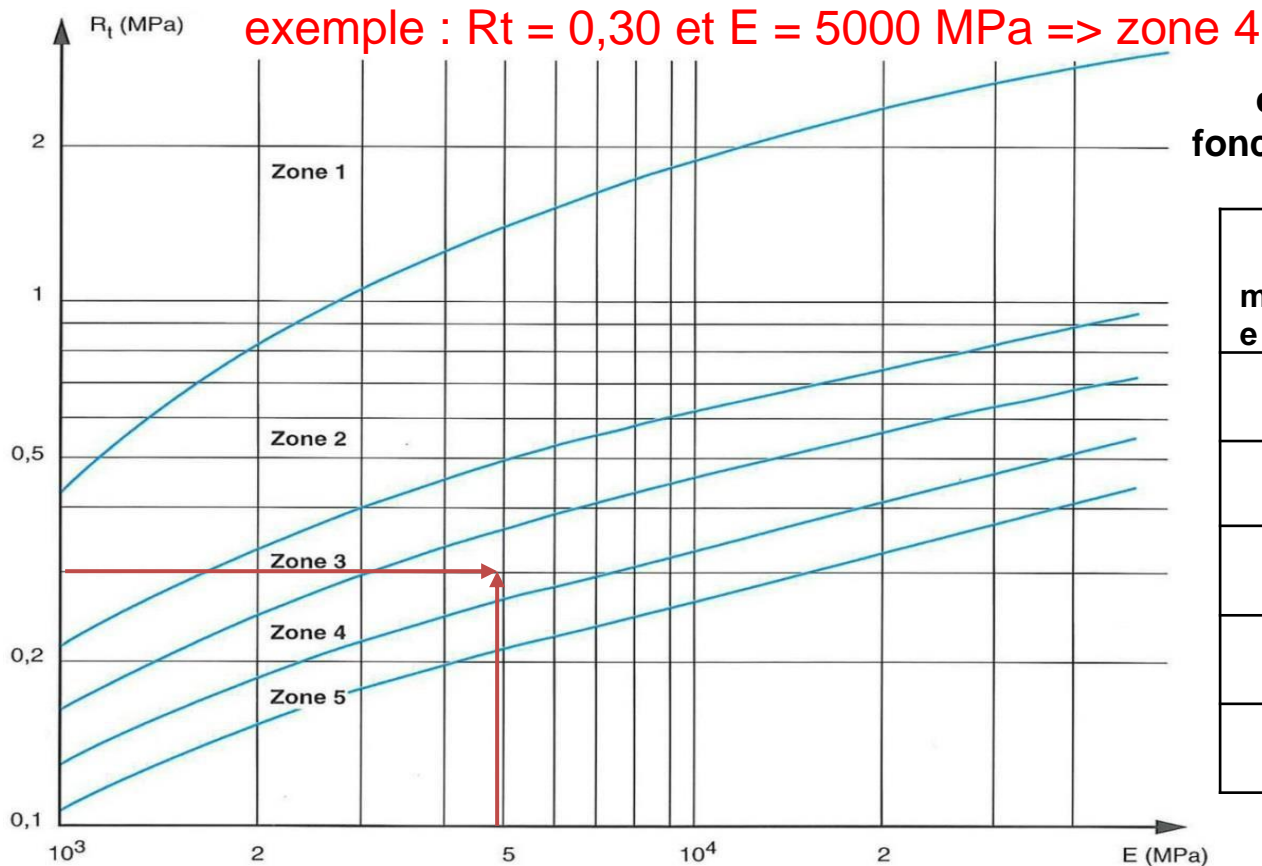


ÉTUDES DE FORMULATION

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 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)

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.

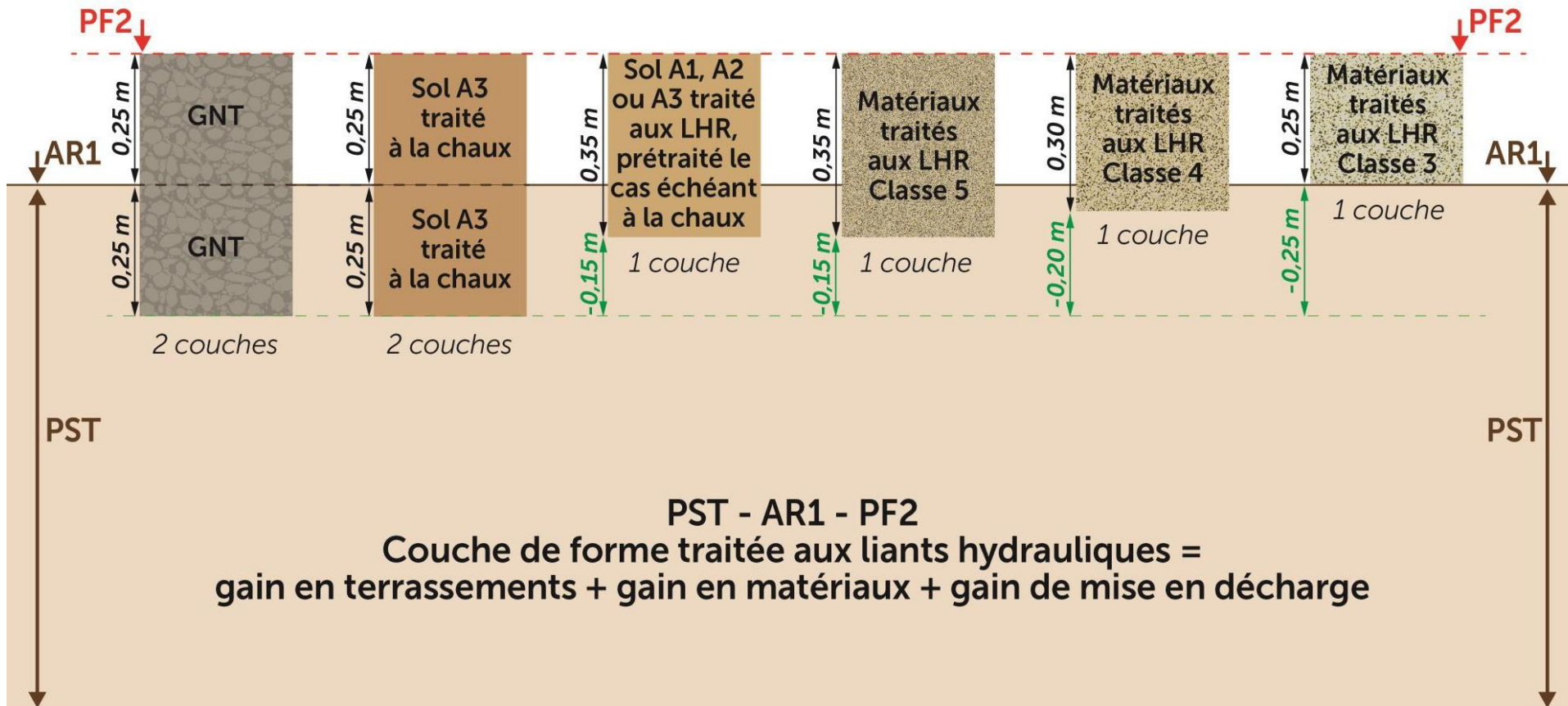


DIMENSIONNEMENT "COUCHE DE FORME" (4)

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

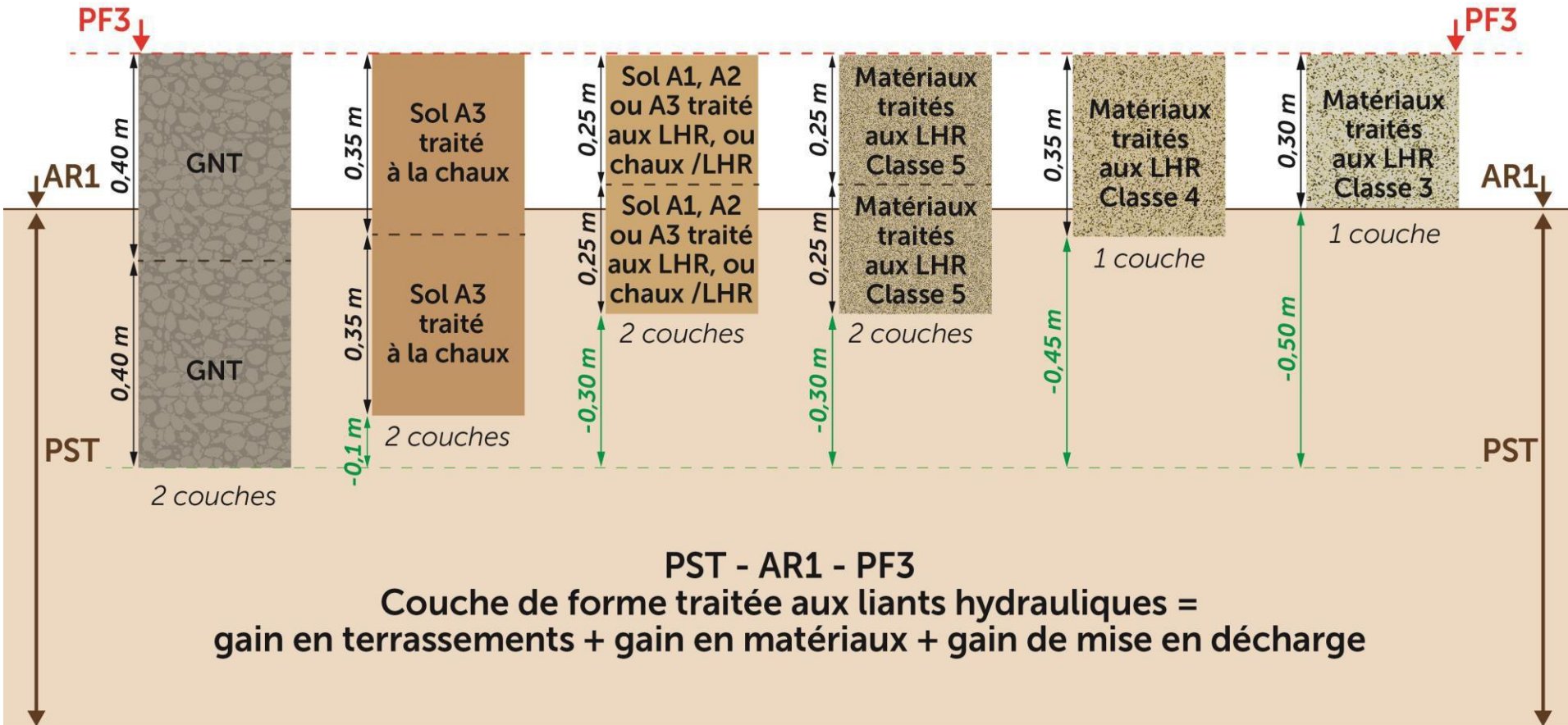
Couche de forme traitée aux liants hydrauliques =
gain en terrassements + gain en matériaux + gain de mise en décharge

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 »



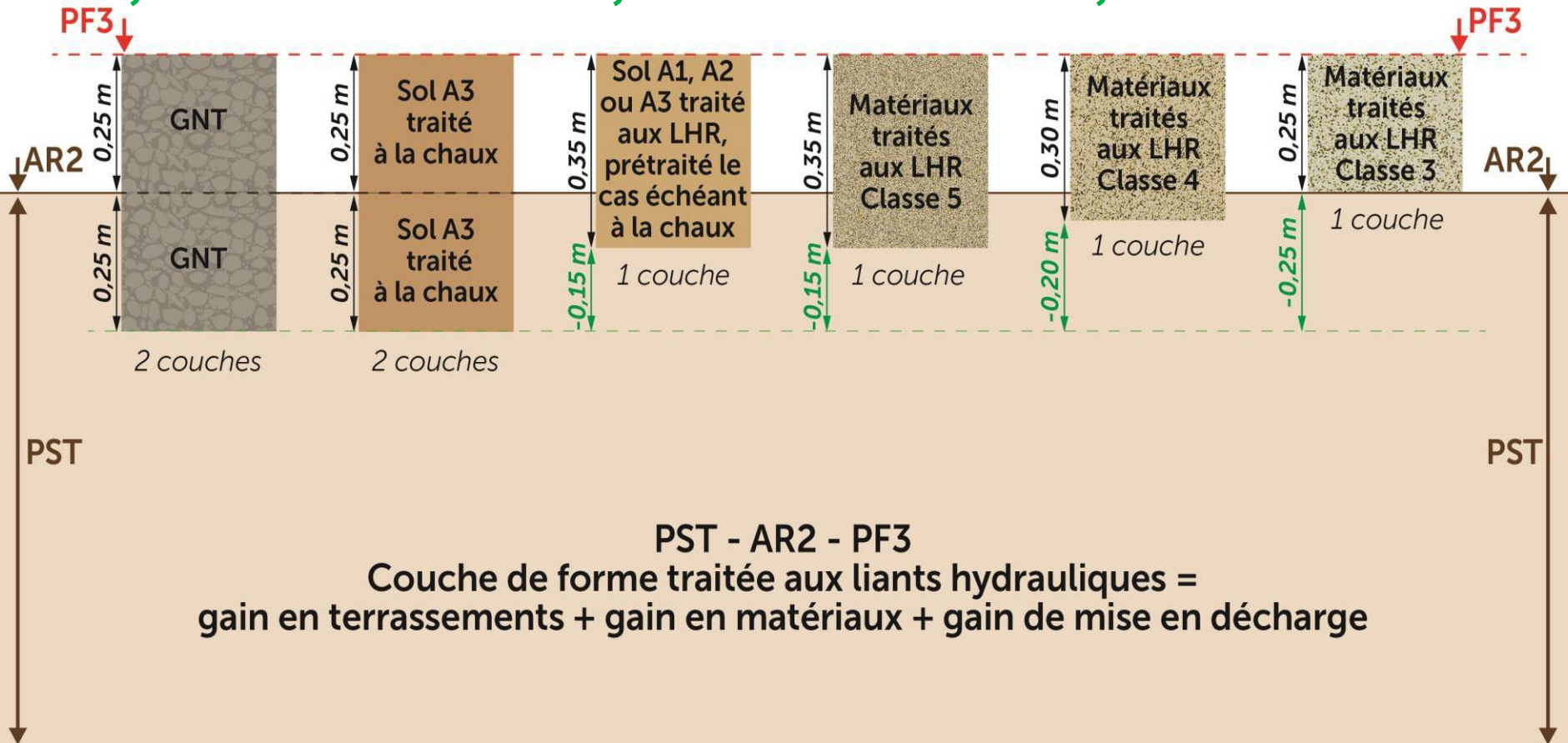
PST - AR1 - PF3

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

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 »



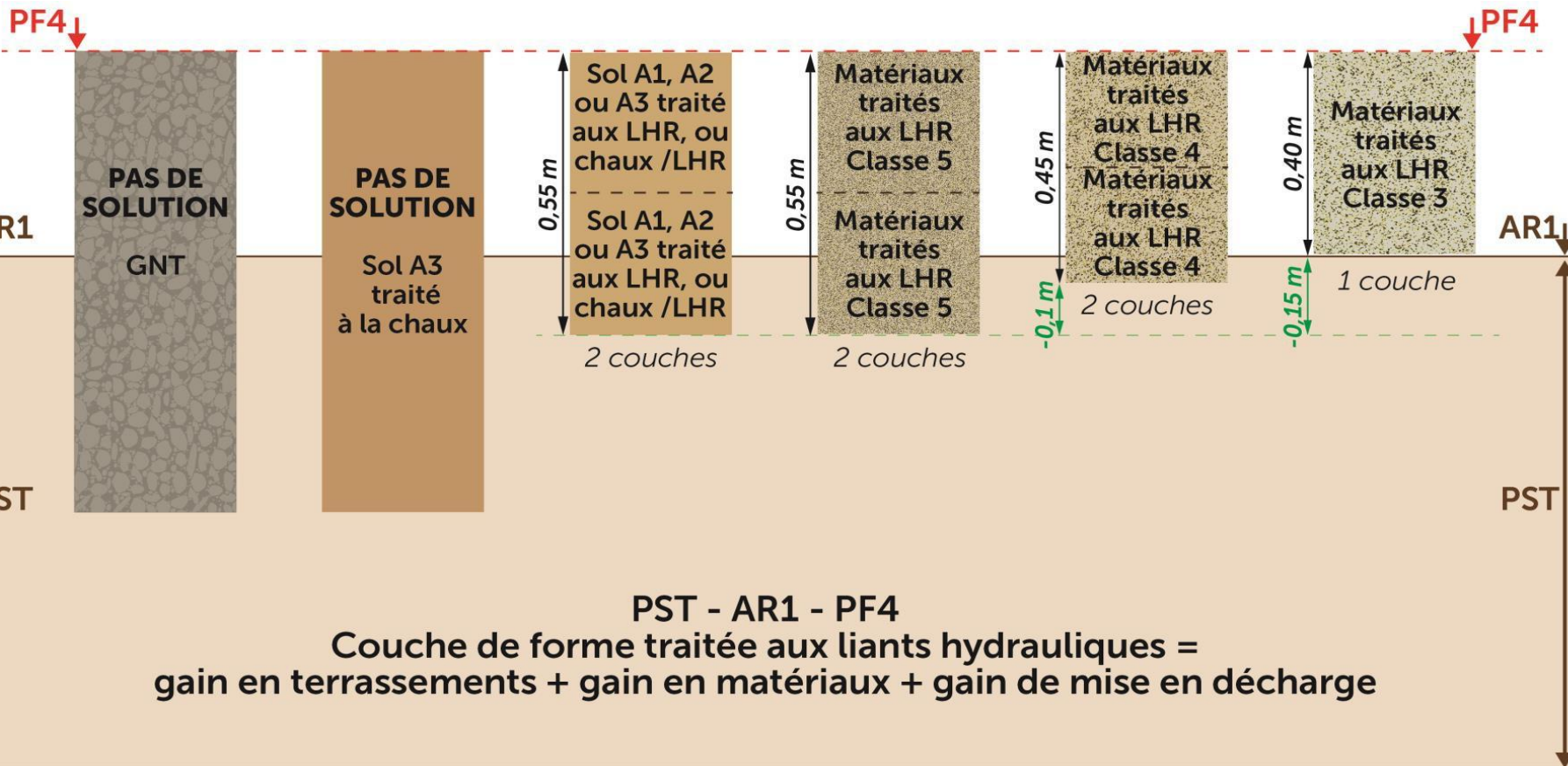
PST - AR2 - PF3
Couche de forme traitée aux liants hydrauliques =
gain en terrassements + gain en matériaux + gain de mise en décharge

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 »



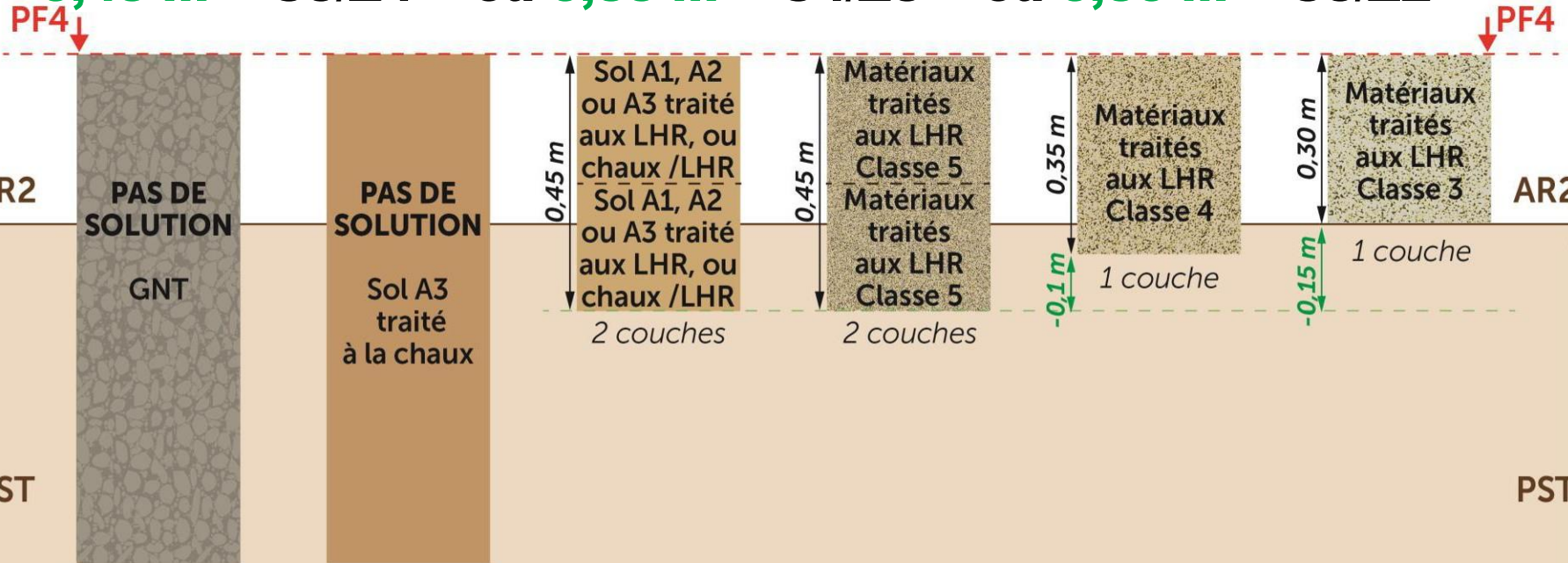
PST - AR1 - PF4
Couche de forme traitée aux liants hydrauliques =
gain en terrassements + gain en matériaux + gain de mise en décharge

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 »



PST - AR2 - PF4

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



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 feuilleteage).



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 $< 0,4$ 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"> • 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
Importance :	réduction :
<ul style="list-style-type: none"> • matériaux « nobles » • transport • matériaux mis en dépôt 	



SIMULATION « PERCEVAL »

INTERÊT DES PF3 ET PF4 DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES

www.infociments.fr

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

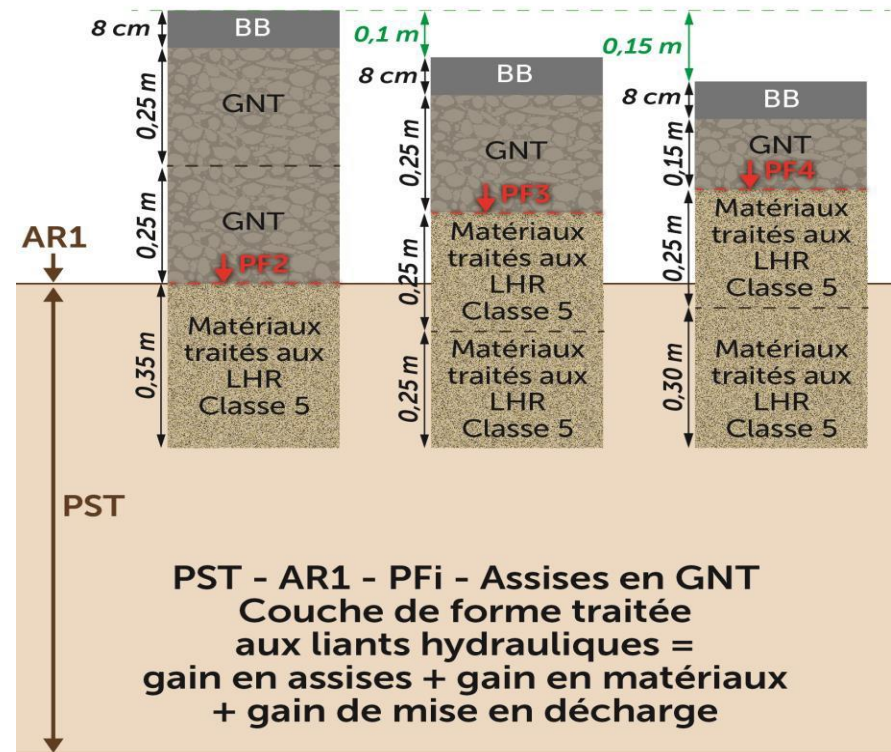


INTERÊT DES PF3 ET PF4 (1)

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
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%

INTERÊT DES PF3 ET PF4 (2)

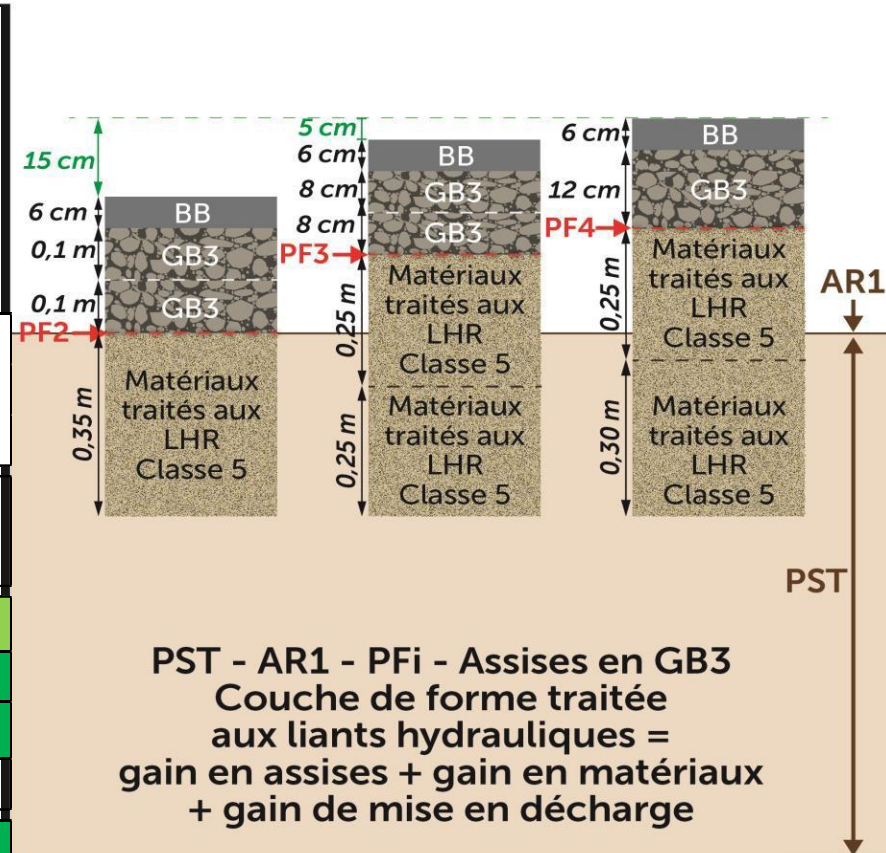
DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSÉES

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 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%



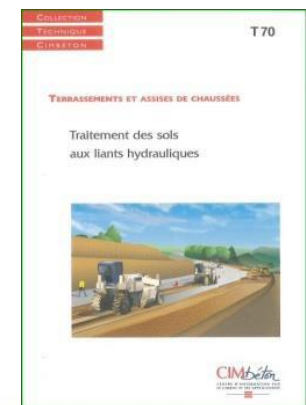


BIBLIOGRAPHIE



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

