

# 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

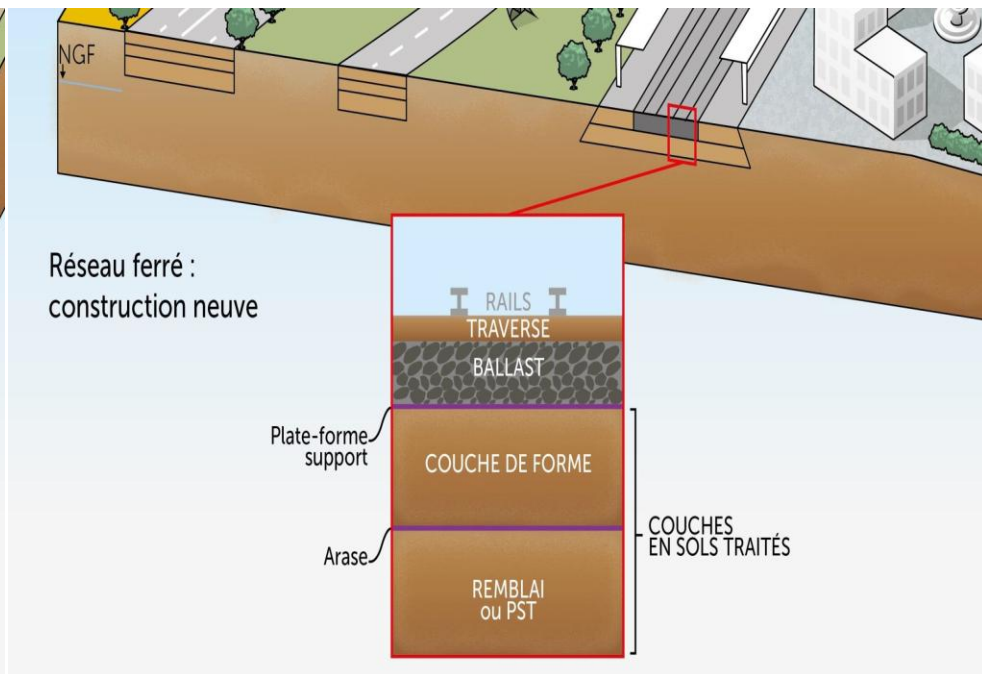
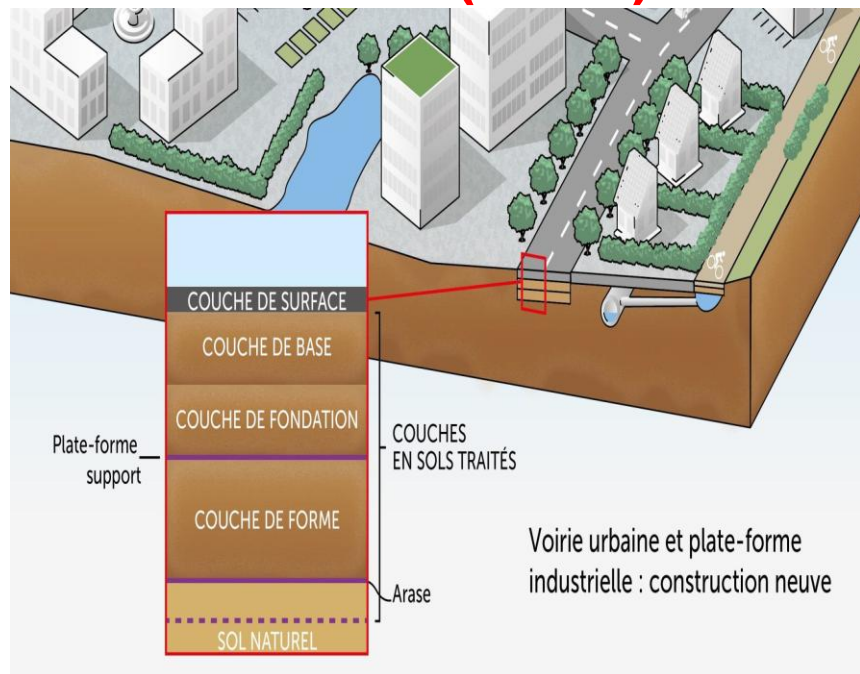
- ❑ **MARCHE EN PLEIN ESSOR** (lié au développement économique)
- ❑ **ENJEUX IMPORTANTS** : 10 à 15 millions de m<sup>2</sup> / an (en France)
- ❑ **TECHNIQUE CODIFIÉE** : guides, normes, DTU...
- ❑ **REALISATION MAÎTRISÉE** : entreprises compétentes, procédés fiables, matériels performants, retours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



**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

## 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, Ip, 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.

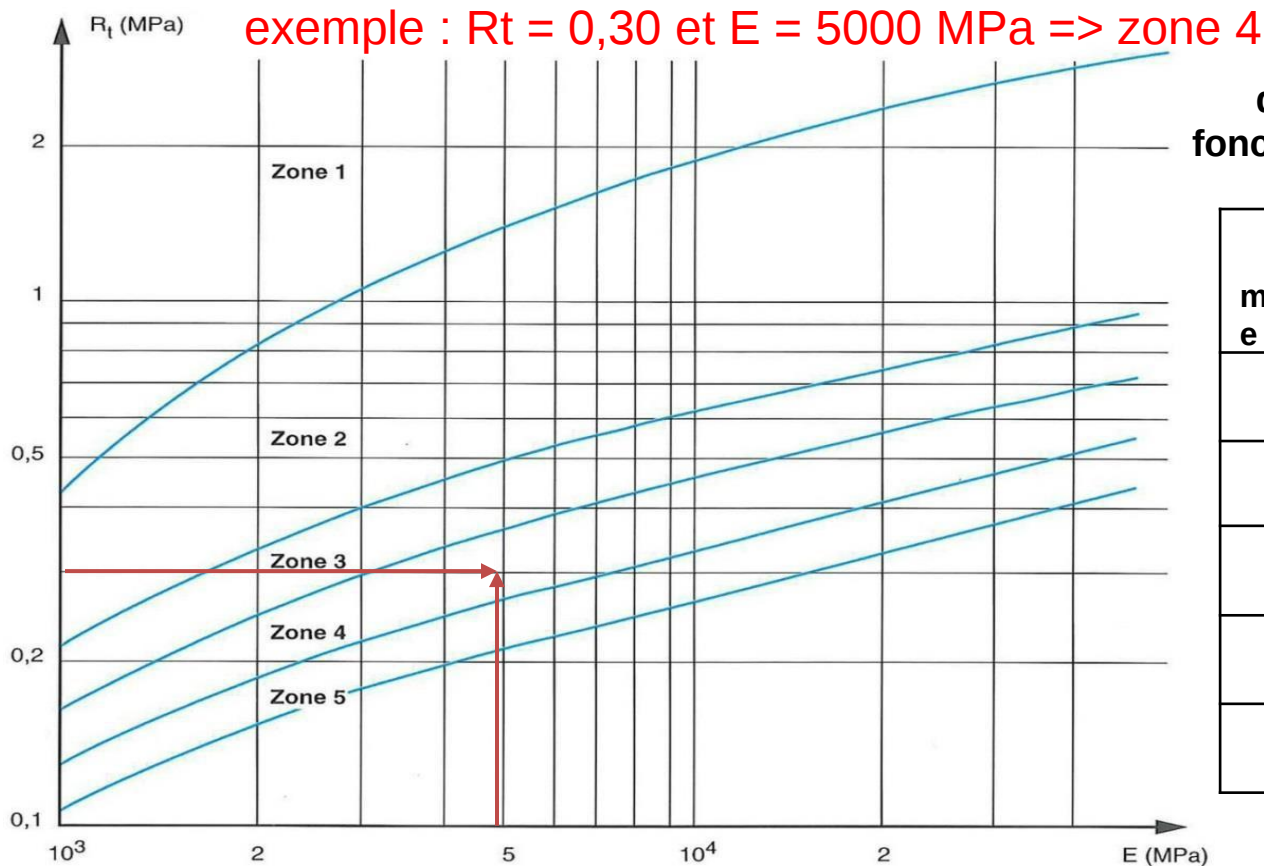


# ÉTUDES DE FORMULATION

| Niveaux des Etudes |                                   | Nature de l'ouvrage                                                       |                                                                                                                                                                 |
|--------------------|-----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Caractéristiques   |                                   | PST / AR -<br>remblais<br>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) :<br>- soit > 0,8 si VBs < 0,5<br>- 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 « $R_t / E$ » - 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.*

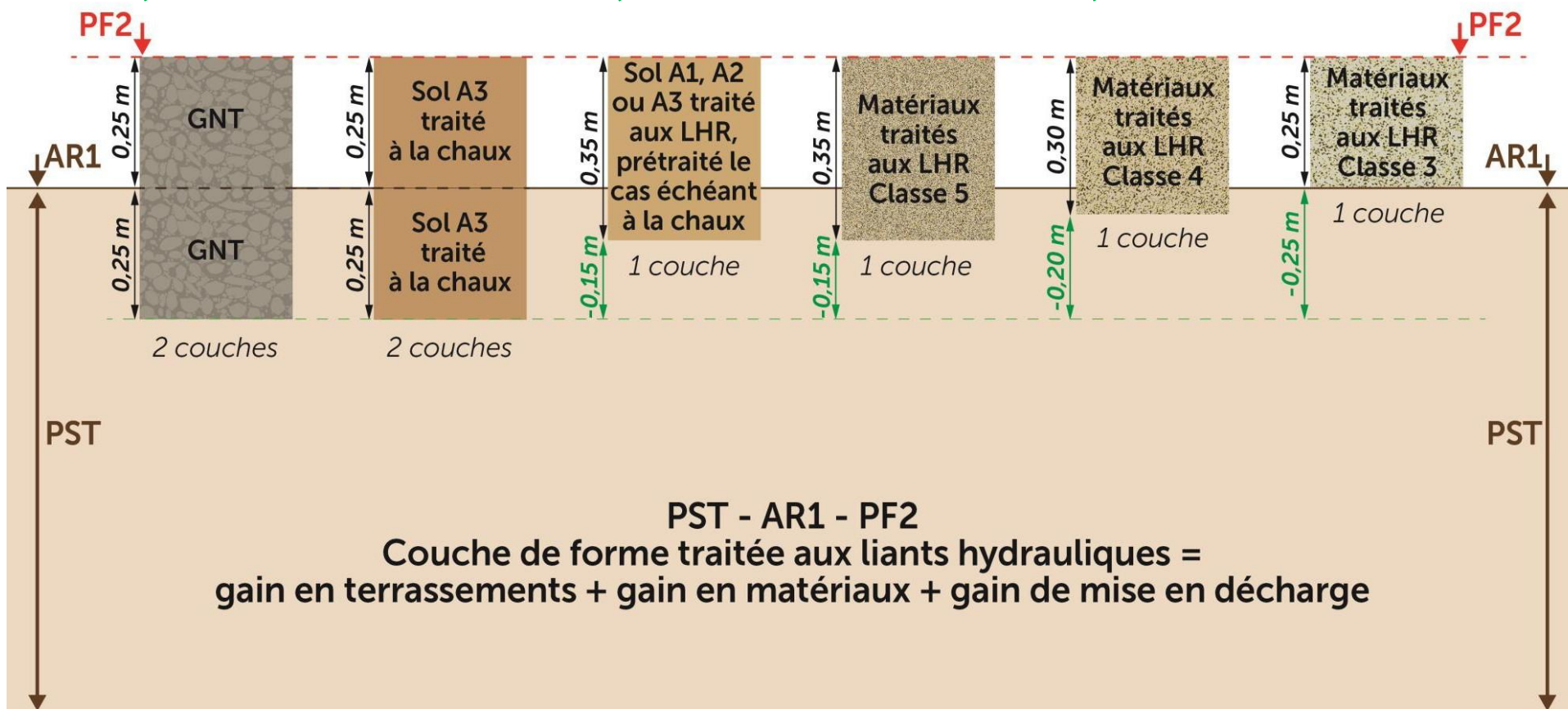


# DIMENSIONNEMENT "COUCHE DE FORME" (4)

## 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

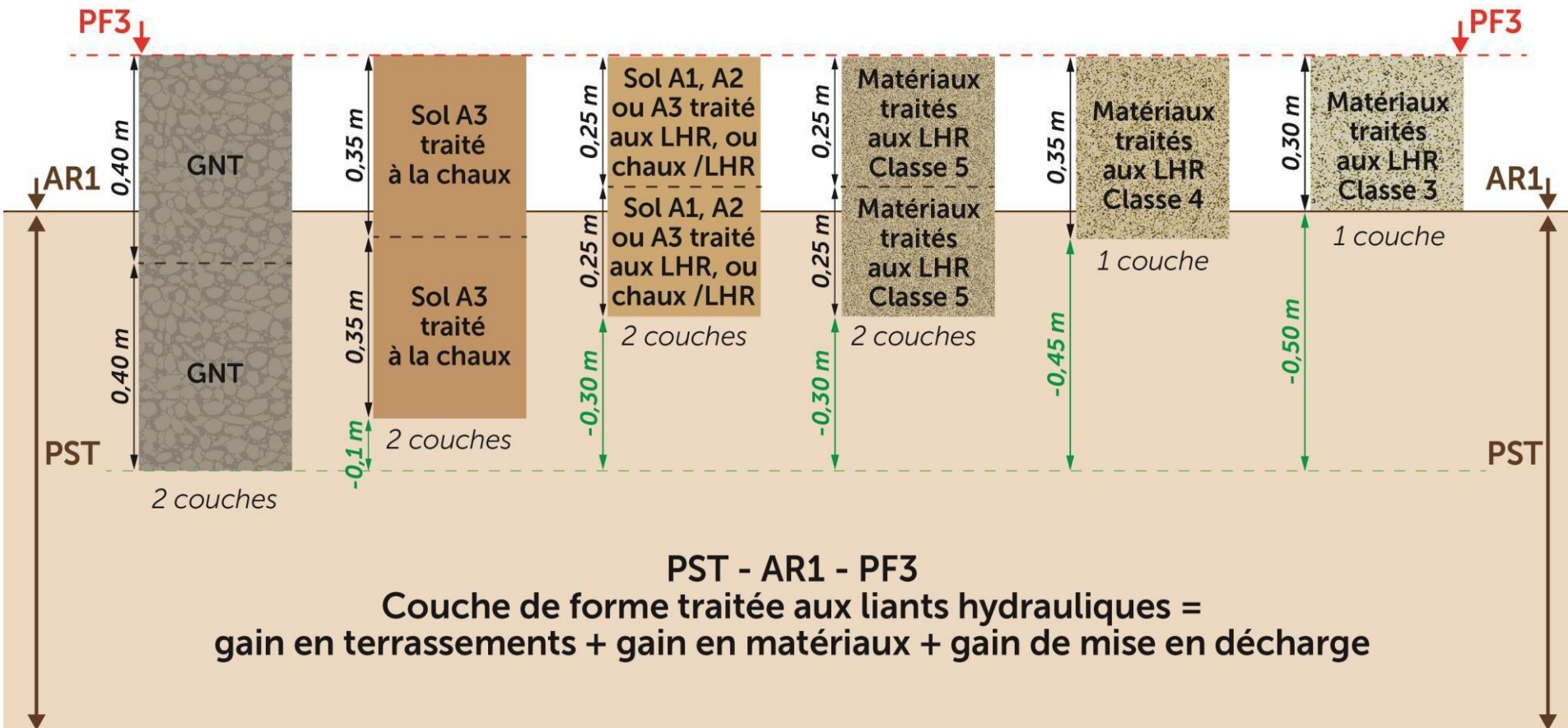
Couche de forme traitée aux liants hydrauliques =  
gain en terrassements + gain en matériaux + gain de mise en décharge

# DIMENSIONNEMENT "COUCHE DE FORME" (5)

## PF3 sur AR1

0,80 m GNT =

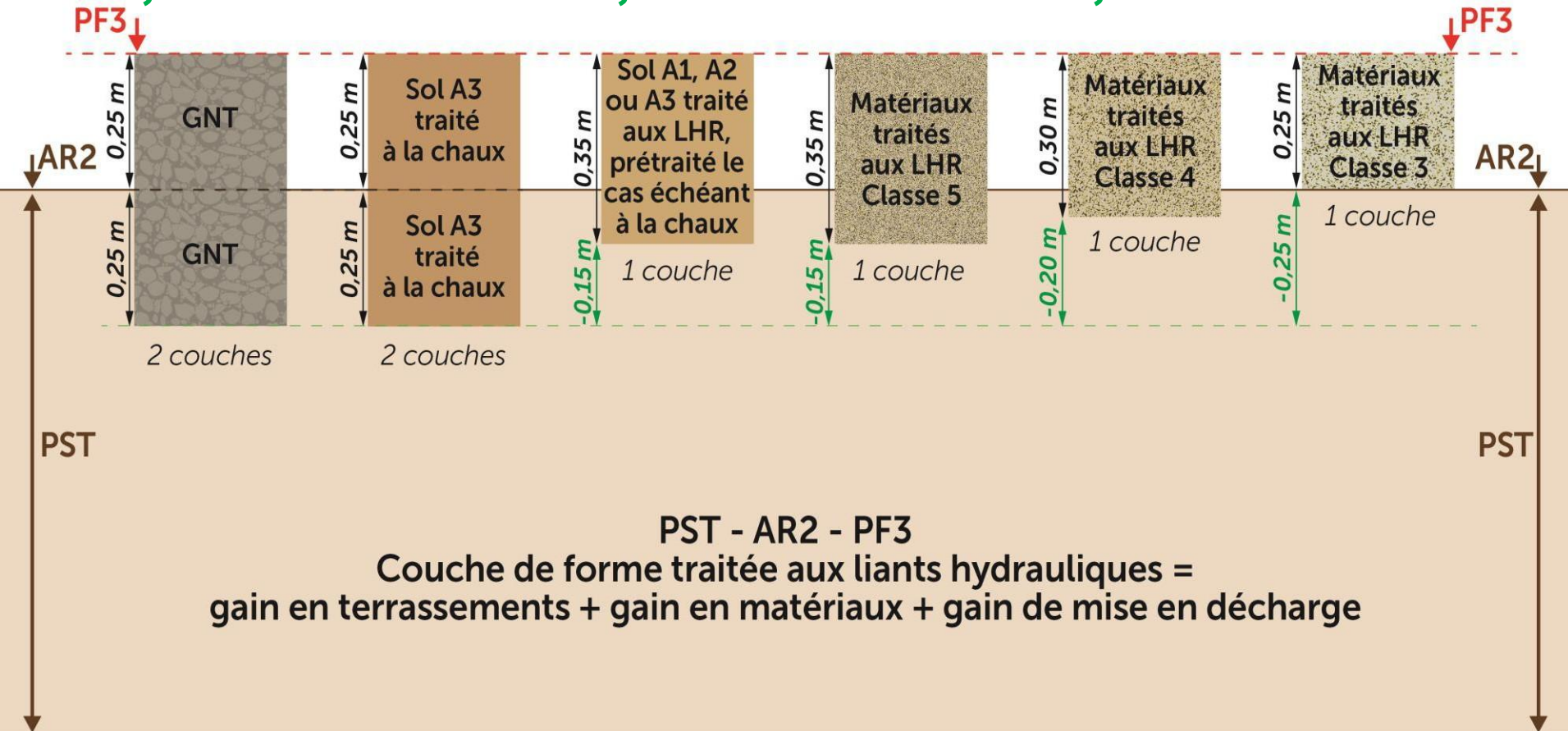
0,50 m « C5/Z4 » ou 0,35 m « C4/Z3 » ou 0,30 m « C3/Z2 »



# 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

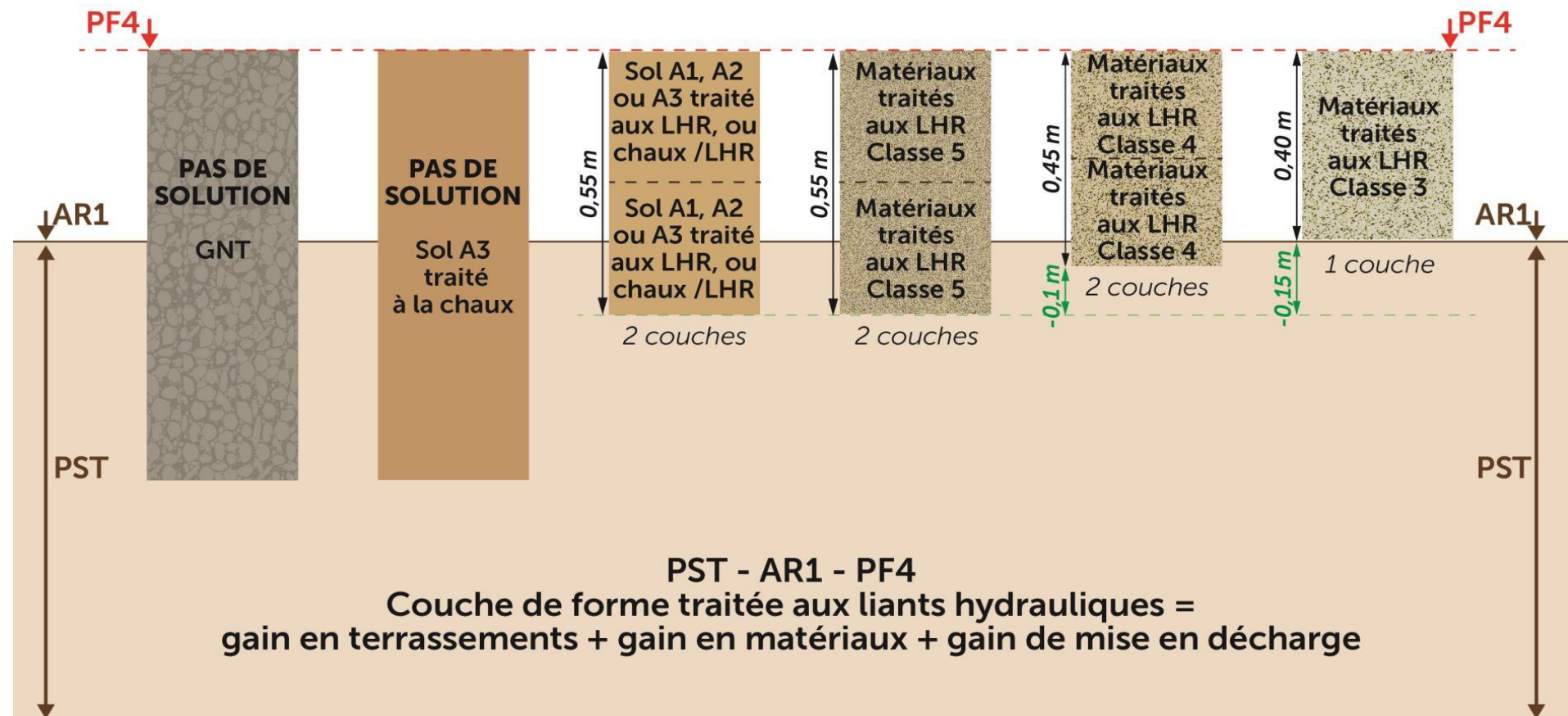
Couche de forme traitée aux liants hydrauliques =  
gain en terrassements + gain en matériaux + gain de mise en décharge

# 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 »**

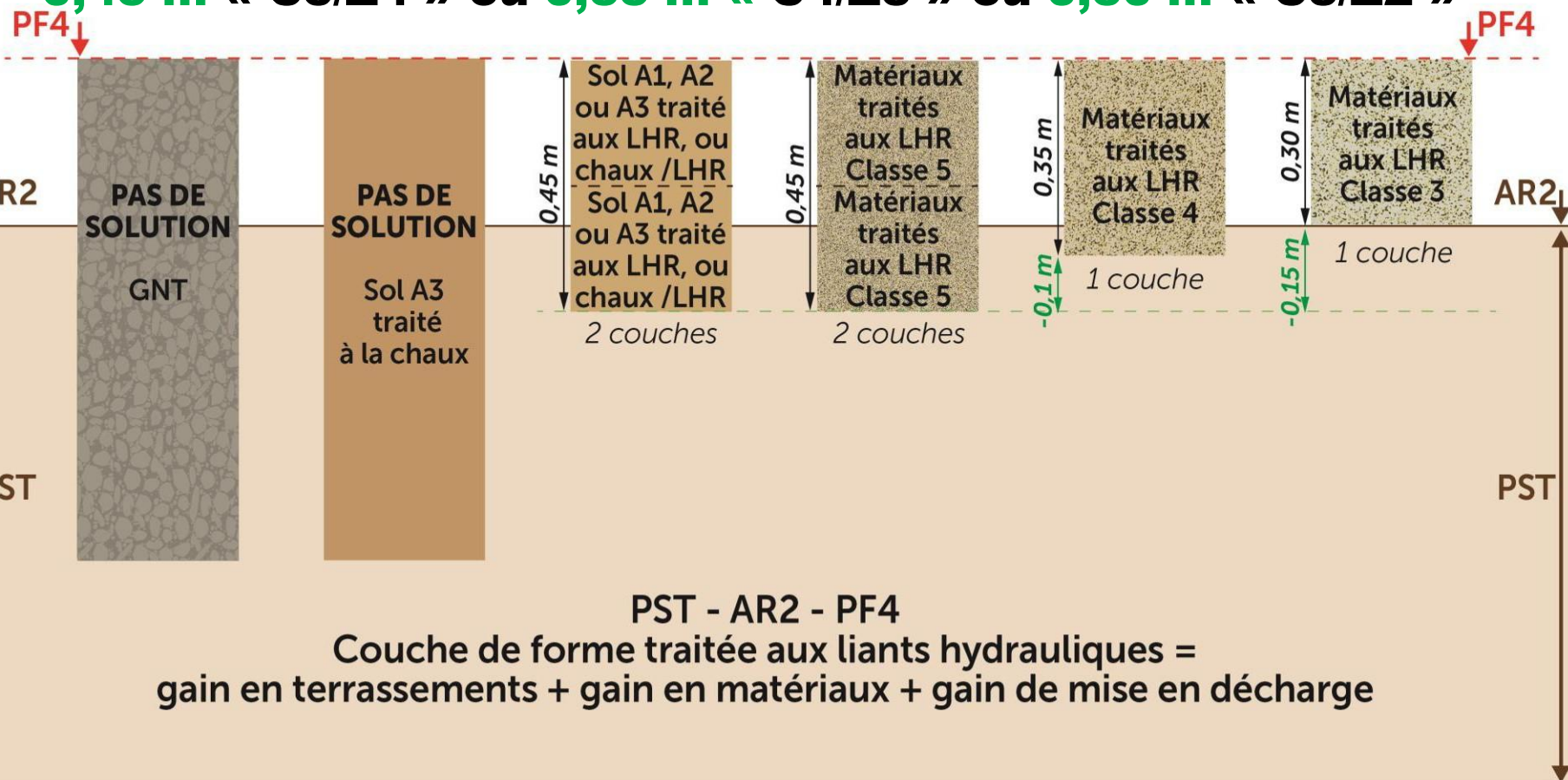


# DIMENSIONNEMENT "COUCHE DE FORME" (8)

**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



# COMPACTAGE

❑ **OBJECTIF** : obtenir la compacité visée ( $q_4$ ,  $q_3$ ,  $q_2$ )

❑ **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).

## ❑ 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



Défectographe « Iacrox »



Gammadensimètre



Dynaplaque II



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 partait 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 CHAUSSEES

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

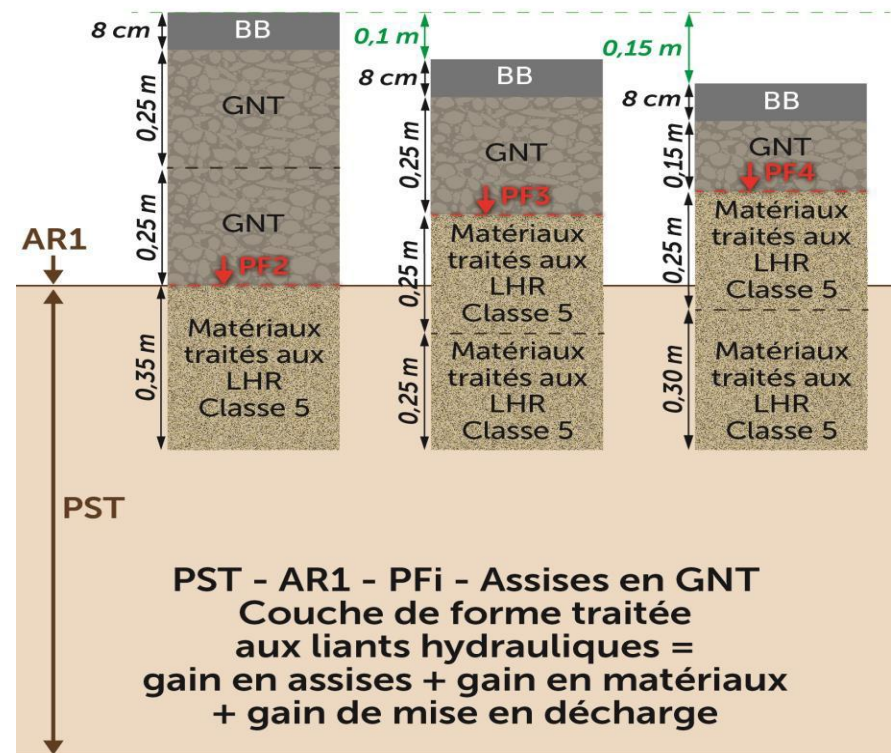
<https://www.infociments.fr/calculateur-perceval>



# 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<br>0,50 m GNT | 0,50 m sol traité<br>0,25 m GNT | 0,55 m sol traité<br>0,15 m GNT |
| Epaisseur totale (cm)                    | 93                              | 83<br>(- 10 cm)                 | 78<br>(- 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%                            |

# INTERÊT DES PF3 ET PF4 (2)

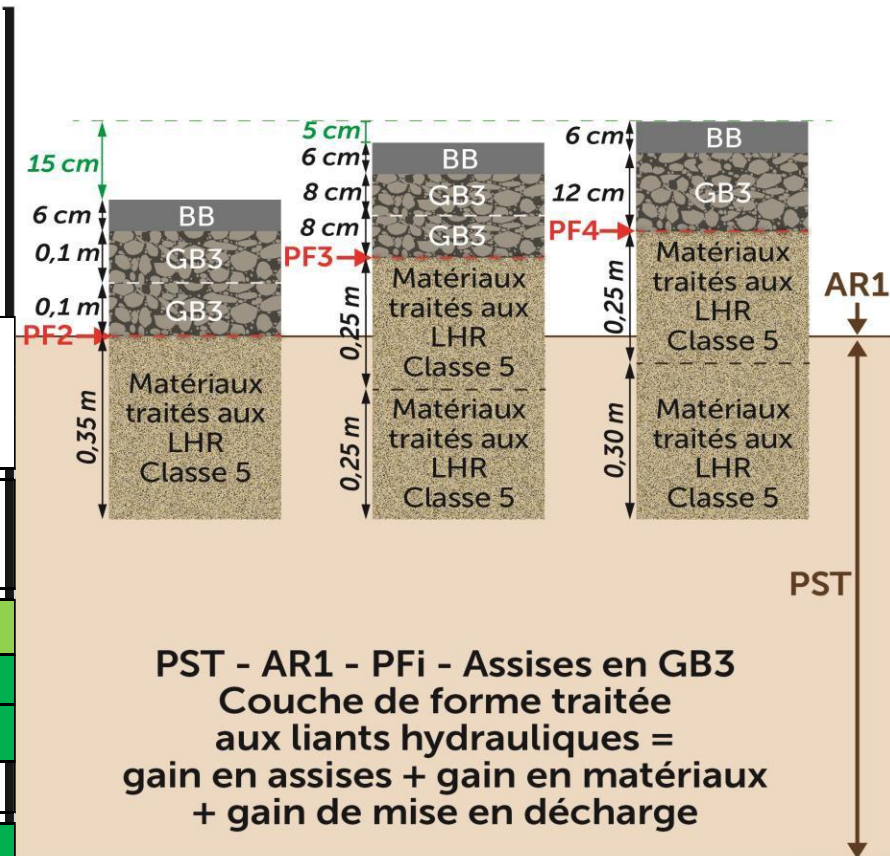
## DIMENSIONNEMENT DES CHAUSSEES

### 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<br>0,20 m GB3 | 0,50 m sol traité<br>0,16 m GB3 | 0,55 m sol traité<br>0,12 m GB3 |

| Epaisseur Assise (cm)                    | 20                  | 16<br>(- 4 cm) | 12<br>(- 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%           |



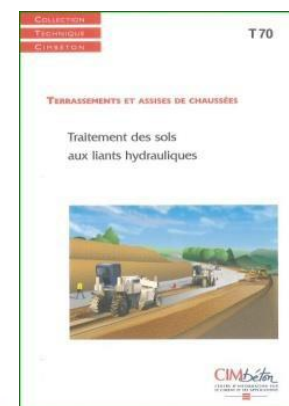


# BIBLIOGRAPHIE



# 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

