



**HAL**  
open science

# Quantification des performances mécaniques en fatigue d'un Loess d'Alsace traité aux liants hydrauliques (rapport final)

Thomas Lenoir, Sophie Ricordel, Thibault Lambert, Marc Jabiri

## ► To cite this version:

Thomas Lenoir, Sophie Ricordel, Thibault Lambert, Marc Jabiri. Quantification des performances mécaniques en fatigue d'un Loess d'Alsace traité aux liants hydrauliques (rapport final). [Rapport de recherche] IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux. 2016, 60p. <hal-01543532>

**HAL Id: hal-01543532**

**<https://hal.science/hal-01543532v1>**

Submitted on 4 Jul 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

## Rapport d'étude : Quantification des performances mécaniques en fatigue d'un Loëss d'Alsace traité aux liants hydrauliques. (Rapport final)

LENOIR Thomas  
ITPE  
Chercheur  
Téléphone : 33 (0)2 40 84 57 85  
Télécopie : 33 (0)2 40 84 59 97  
thomas.lenoir@ifsttar.fr

Date : 12/09/2016

Auteurs : Thomas Lenoir : IFSTTAR / GERS / GMG  
Sophie Ricordel : IFSTTAR / GERS / GMG  
Thibault Lambert : LR de Strasbourg/CEREMA  
Marc Jabiri : LR de Strasbourg /CEREMA

Nomenclature d'activité : RP2-F15138

**Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR)**

14-20 Boulevard Newton  
Cité Descartes, Champs sur Marne  
77447 Marne la Vallée Cedex 2  
Tél. : 01 81 66 80 00  
Fax : 01 81 66 80 01

**Laboratoire Géomateriaux et Modélisation  
Géotechnique**

IFSTTAR Centre de Nantes  
Allée des Ponts et Chaussées  
Route de Bouaye – CS4  
44344 Bouguenais Cedex  
Tél. : 02 40 84 58 00  
Fax : 02 40 84 59 99



# Projet déviation de Strasbourg

## Expertise du traitement des sols dans le cadre de la deuxième phase de la Rocade Sud de Strasbourg (RN353)

*Quantification des performances mécaniques en fatigue d'un Læss  
d'Alsace traité aux liants hydrauliques.*

# Sommaire

1/Contexte .....	6
1.1/ Présentation .....	6
1.2/ Description des essais effectués .....	6
2/ Identification des Lœss du site de Strasbourg .....	7
2.1/ Identification du gisement .....	7
2.1.1/ <i>Contexte géologique</i> .....	7
2.1.2/ <i>Reconnaissance du gisement</i> .....	8
2.2/ Identification géotechnique des limons lœssiques .....	9
2.2.1/ Analyse granulométrique .....	9
2.2.2/ Argilosité .....	9
2.2.3/ Teneur en matière organique .....	10
2.2.4/ Masse volumique des particules .....	10
2.2.5/ Proctor- Indice Portant Immédiat (IPI) .....	10
2.2.6/ Conclusion .....	11
3/ Etudes de formulation .....	11
3.1/ Matériels et méthodes .....	11
3.1.1/ Description des liants .....	11
3.1.2/ Dimensions et modalités de préparation des éprouvettes .....	12
3.2/ Lœss traité au ZIP 35 .....	12
3.2.1/ Lœss traité avec 5.5% de ZIP 35 .....	12
3.2.2/ Lœss traité avec 7% de ZIP 35 .....	13
3.3/ Lœss traité au PHOCAL C15 .....	14
3.3.1 / Lœss traité avec 5.5% de PHOCAL C15 .....	14
3.3.2/ Lœss traité avec 7% de PHOCAL C15 .....	16
3.4/ Lœss traité au PHONOS .....	17
3.4.1 / Lœss traité avec 5.5% de PHONOS .....	17
3.4.2/ Lœss traité avec 7% de PHONOS .....	18
3.5/ Zones de classement des matériaux .....	19
4/ Etude en fatigue .....	19
4.1/ Mesures préliminaires de résistance en compression simple ( $R_c$ , E) .....	19
4.1.1 Modalités d'essais .....	19
4.1.2 Résultats .....	19
4.2/ Mesures de fatigue mécanique .....	22
4.2.1 Principe de l'essai .....	22
4.2.2 Préparation des éprouvettes et modalités d'essais .....	23
4.2.3 Résultats .....	23
4.2.4 Application à l'utilisation en assises de chaussées .....	25
5/ Conclusions .....	25
6/ BIBLIOGRAPHIE .....	26
7/ ANNEXES .....	29

# 1/Contexte

## 1.1/ Présentation

Dans le cadre des études de projet concernant la rocade Sud de Strasbourg, la DREAL Alsace, le cimentier HAURI et l'IFSTTAR ont établi une collaboration scientifique concernant la possibilité d'utilisation dans les infrastructures routières de matériaux présents dans l'emprise du projet.

Les matériaux concernés sont des lœss ; il s'agit d'un limon éolien qui recouvre en partie la plaine d'Alsace et dont l'une des particularités est de présenter une certaine homogénéité au niveau géotechnique.

L'objet de la collaboration scientifique est de mesurer les performances mécaniques de ce matériau traité avec des liants hydrauliques de l'entreprise HAURI. Ces performances seront mesurées pour commencer conformément aux documents en vigueur pour valider leur utilisation dans la partie Terrassement de l'ouvrage. Une étude en fatigue mécanique sera ensuite conduite afin de déterminer les paramètres permettant d'introduire ces matériaux dans le dimensionnement mécanique de la chaussée.

## 1.2/ Description des essais effectués

Les travaux ont été menés en trois phases :

- **phase 1** : identification des Lœss du site d'un point de vue géologique et géotechnique.

Cette identification géotechnique est fondée sur les essais classiques décrits dans les documents en vigueur [1,2];

- **phase 2** : étude de formulation.

Une étude de formulation conformément au document en vigueur [3] est ensuite faite pour caractériser le traitement retenu. Cette étude porte sur le mélange des lœss avec trois liants hydrauliques du cimentier allemand HAURI. Les liants retenus sont :

- le PHONOS, liant pouzzolanique CEMII / BQ 42.5 N
- le ZIP 35, liant routier HRB 32.5E
- PHOCAL C15, liant routier HRB 32.5 E

Pour chacun des liants, 2 dosages, 5.5% et 7%, sont étudiés.

L'étude consistera à déterminer :

- Les caractéristiques de mise en œuvre des mélanges
- Les études des performances mécaniques comprenant :
  - o Âge autorisant la circulation sur la couche traitée
  - o Résistance à l'immersion au jeune âge :
  - o Performance escomptables à long terme et résistance au gel :

- **phase 3** : étude en fatigue des matériaux sur une des formulations.

En préambule de cette étude, la configuration testée est déterminée suite à des essais de compression simple réalisés sur chacune des formulations après différents temps de cure.

Pour la formulation retenue, des essais de flexion 4 points [4,5] monotones et cycliques sont réalisés afin de déterminer les performances en fatigue des matériaux.

Les expériences menées sont détaillées dans les paragraphes suivants.

## **2/ Identification des Löss du site de Strasbourg**

### **2.1/ Identification du gisement**

#### *2.1.1/ Contexte géologique*

Le löss est une roche sédimentaire détritique meuble formée par l'accumulation de limons issus de l'érosion éolienne (déflation), dans les régions désertiques et périglaciaires [6]. Les dépôts éoliens de couverture résultent du transport par le vent à moyenne et longue distance. Ils s'étendent en couverture sur plus de 10 % de la surface des continents et concernent les sables fins (sables de couverture) et les limons (löss).

Le löss est formé principalement de silice (quartz détritique) et de carbonate de calcium ( $\text{Ca CO}_3$ ) [7]. Il contient, en proportion moindre, des feldspaths, de la biotite (mica) et des argiles, souvent de la kaolinite (ces argiles pouvant être agglomérées et former des grains de limon fin).

Le löss typique est une roche meuble limoneuse, homogène, finement poreuse, de couleur jaunâtre à brunâtre, souvent calcaire (10 à 30% de  $\text{CaCO}_3$ ). La composition granulométrique d'un löss typique correspond à du sable fin pour 10%, du limon pour 75% (essentiellement du limon grossier) et 15% d'argile. Les sables éoliens de couverture sont limono-sableux avec une dominante de sable fin. La structure se caractérise par un très bon tri granulométrique dû à son origine éolienne, avec essentiellement des grains compris entre 20 et 80 micromètres [8-9].

Il est homogène, sans stratification mais avec une très forte porosité résultant de traces de racines et d'une cimentation carbonatée des grains [10]. Dans le löss peuvent se trouver des concrétions calcaires appelées poupées de löss.

Lorsque les couvertures sont épaisses, les löss comportent des paléosols (sols anciens fossilisés) interglaciaires qui montrent que ces dépôts se sont mis en place au cours de plusieurs cycles interglaciaire-glaciaire.

D'après la carte géologique de STRASBOURG (Figure 1) à l'échelle 1/50000 [10], le site serait constitué, sous de probables remblais d'aménagement et/ou une faible épaisseur de terre végétale, de löss würmiens recouvrant les cailloutis du Rhin et de la Bruche OEy/Fy. Le würm correspond à la quatrième et dernière glaciation du quaternaire dans les régions alpines, entre -80000 et -10000 ans avant J.-C.



**Figure 1 :** Carte géologique concernant le projet de la rocade sud de Strasbourg [4].

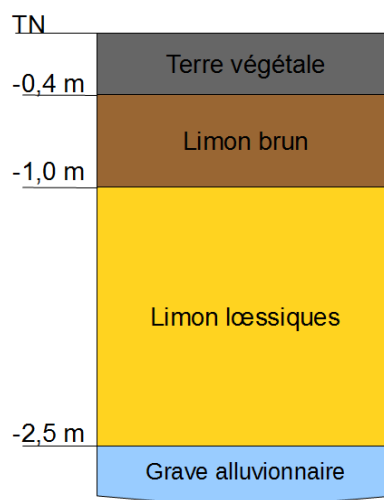
### 2.1.2/ Reconnaissance du gisement

La caractérisation du gisement et son homogénéité ont été évaluées conformément aux prescriptions du GTS [1] appliquées à la réalisation des assises de chaussées.

La zone de prélèvement, représentant un gisement d'environ  $3.10^4 \text{ m}^3$ , a fait l'objet de 18 sondages à la pelle mécanique et de 70 prélèvements qui ont donné lieu à 43 identifications GTR [3]. Le plan d'implantation des sondages, les coupes de sondage et les résultats des essais en laboratoire sont présentés en annexe 3, 4 et 5.

Sur site, on peut distinguer visuellement deux familles de matériau fin par leur couleur : les limons lœssiques beiges et les limons bruns (Figure 2). Les limons bruns ont fait l'objet d'essais d'identifications dont les résultats sont présentés en annexe 5.

L'objet de l'étude concernera uniquement les matériaux de la couche de limons lœssiques beiges dont les résultats des essais d'identifications sont présentés ci-après.



**Figure 2 :** Coupe synthétique du terrain en place

## 2.2/ Identification géotechnique des limons loessiques

### 2.2.1/ Analyse granulométrique

La dimension maximale ( $D_{max}$ ) des plus gros éléments contenus dans le sol est de 5 mm. Elle est inférieure à 50 mm.

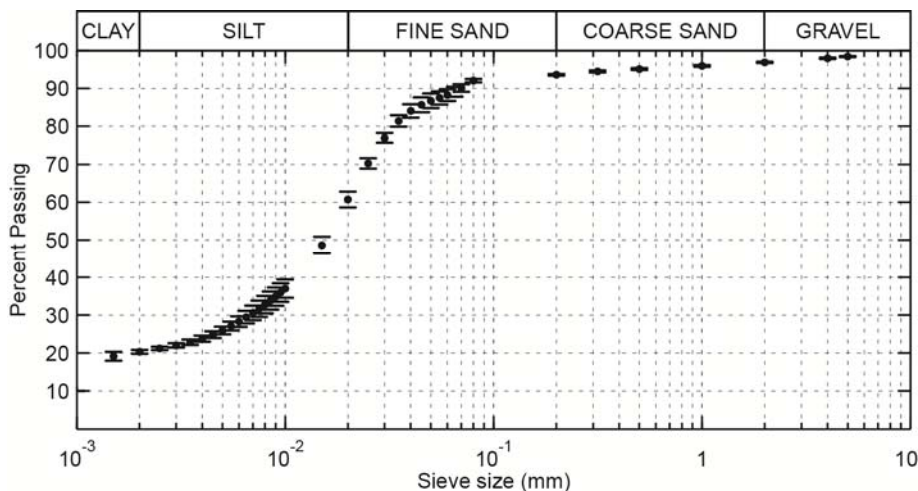
L'analyse granulométrique a été faite sur la fraction 80  $\mu$ m-5 mm par tamisage à sec après lavage [11] et sur la fraction 0- 80  $\mu$ m par sédimentation [12]. Pour la répétabilité des calculs, 35 granulométries et 4 sédimentologies ont été effectuées. La synthèse des résultats est regroupée dans le tableau 1 et la figure 3.

Le tamisat moyen à 80  $\mu$ m est de 90,8 (0.4) %. Il est supérieur au seuil de 35%. Le comportement du sol peut être considéré comme régi par celui de la fraction fine. Le matériau est classé A au sens du GTR [1].

**Tableau 1** : Synthèse des résultats de l'analyse granulométrique

	Wnat	Passant 80 $\mu$ m	Passant 2mm	Passant 5mm
<b>MINI</b>	<b>16,5</b>	<b>79,6</b>	<b>89,4</b>	<b>93,3</b>
<b>MAXI</b>	<b>23,3</b>	<b>96,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
<b>MOYENNE</b>	<b>19,4</b>	<b>90,8</b>	<b>97,4</b>	<b>99,3</b>

Dans le détail, la proportion d'argile ( $d < 2 \mu$ m) est de 20.3%, la proportion de silt ( $2 \mu$ m  $< d < 20 \mu$ m) est de 40.5%, la proportion de sable fin ( $20 \mu$ m  $< d < 200 \mu$ m) est de 32.5%, la proportion de sable grossier ( $200 \mu$ m  $< d < 2$ mm) est de 3.3%, et la proportion de gravier ( $2$  mm  $< d < 20$ mm) est de 3.0%. Il s'agit d'un matériau très fin sablo-silteux comprenant une proportion d'argile non négligeable.



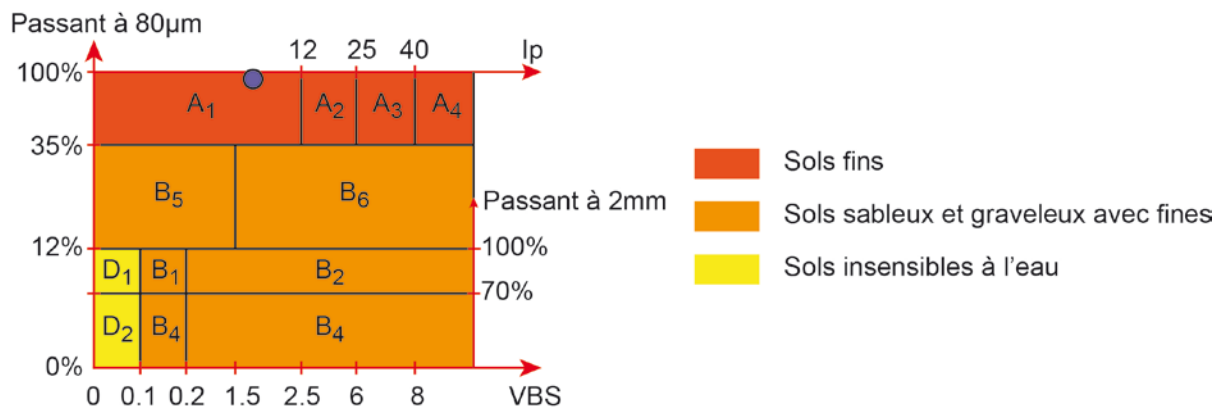
**Figure 3** : Synthèse de l'analyse granulométrique

### 2.2.2/ Argilosité

La valeur au bleu [15] a été déterminée à partir de 35 mesures. Elle est comprise entre 1,34 et 2,29 g/100g<sub>solsec</sub> (tableau 2). Au sens du GTR [1], ce matériau est classé A1 (Figure 4).

La limite de liquidité WL a été mesurée au cône de pénétration [13]. Deux mesures ont été réalisées et en moyenne WL = 30%. La limite de plasticité WP a été mesurée au rouleau [14] sur

un échantillon.  $WP = 22\%$ . L'indice de plasticité est  $IP = WL - WP = 8\%$ . Il est conforme aux résultats des précédentes mesures de VBS.



**Figure 4** : classification géotechnique du matériau naturel [2]

**Tableau 2** : Synthèse des résultats de VBS

	VBS
MINI	1,39
MAXI	2,29
MOYENNE	1,73
ETENDUE DES MESURES (e)	0,90
ETENDUE DES MESURES (e <sub>r</sub> )	51,9%

### 2.2.3/ Teneur en matière organique

La teneur en matière organique a été mesurée [16] sur 3 échantillons et la valeur moyenne est de 0.8%.

### 2.2.4/ Masse volumique des particules

Plusieurs mesures de masse volumique des particules ont été réalisées [17] ;  $\rho_s = 2.72 \text{ t/m}^3$ .

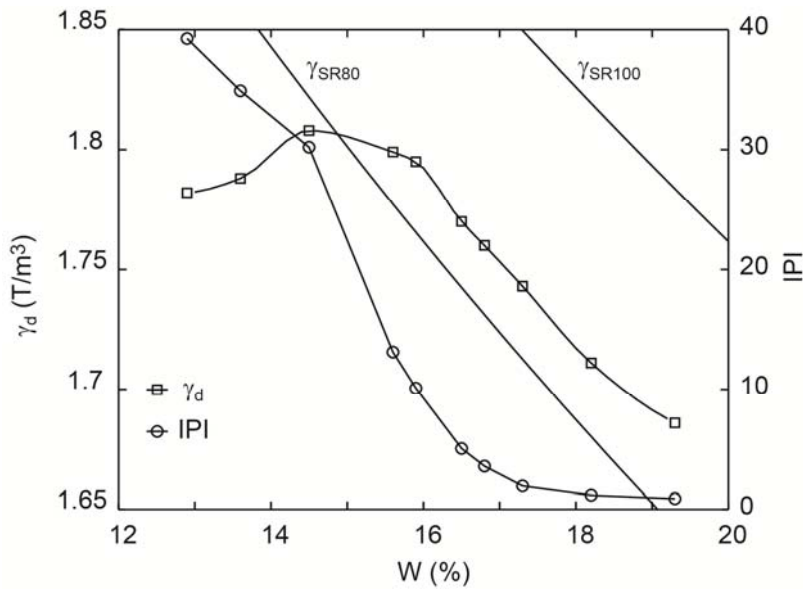
### 2.2.5/ Proctor- Indice Portant Immédiat (IPI)

Trois Proctor ont été réalisés sur des échantillons présentant des valeurs de VBS faibles, moyennes et élevés. La synthèse des résultats est présentée dans le tableau 3, figure 5 et en annexe 5.

**Tableau 3** : Synthèse des résultats des essais Proctor

	W <sub>OPN</sub> (%)	pdopn (t/m <sup>3</sup> )
MINI	14,0	1,79
MAXI	15,0	1,8
MOYENNE	14,5	1,81
ETENDUE (e)	1,0	0,03
ETENDUE RELATIVE (e <sub>r</sub> )	6,9%	0,02

Les références de compactage à l'énergie Proctor normale [18] sont :  $\gamma_s = 1.81 \text{ T/m}^3$  pour une teneur en eau  $W_{OPN} = 14.5\%$ . Les résultats d'essai sont synthétisés à la figure 6.



**Figure 6 :** mesures des densités Proctor Normal et Indices Portants Immédiats du matériau naturel en fonction de la teneur en eau.

Selon le GTR [3], les seuils entre les différents états hydriques du matériau sont présentés dans le tableau 4 :

**Tableau 4 :** Synthèse des plages d'état hydrique

$w_{opn}$ (%)	14,5
État très humide « th » ( $IPI \leq 3$ )	$w_n \geq 17$
État humide « h » ( $IPI > 3$ et $1,10 w_{opn} \leq w_n$ )	$16 \leq w_n \leq 17$
État moyen « m » ( $0,9 w_{opn} \leq w_n \leq 1,10 w_{opn}$ )	$13 \leq w_n \leq 16$
État sec « s » ( $0,7 w_{opn} \leq w_n \leq 0,9 w_{opn}$ )	$10 \leq w_n \leq 13$
État très sec « ts » ( $w_n < 0,7 w_{opn}$ )	$w_n < 10$

## 2.2.6/ Conclusion

Les résultats de VBS ne permettent pas, à ce stade, de considérer le gisement de loess comme étant suffisamment homogène du point de vue de son argilosité pour envisager de l'utiliser pour une couche d'assise. Pour cela, il sera nécessaire lors de la phase chantier de mettre en place une procédure de mise en œuvre afin d'améliorer son homogénéité.

Avec une mise en stock intermédiaire (avec mise en stock par couche et reprise frontale) et un passage du malaxeur sur les matériaux avant le traitement aux liants hydrauliques, l'homogénéisation sera suffisante pour atteindre une étendue relative  $e_r < 40\%$ . L'homogénéité du gisement pourra alors être classée H1 selon le GTS assise de chaussée [31].

## 3/ Etudes de formulation

### 3.1/ Matériels et méthodes

#### 3.1.1/ Description des liants

Le ZIP 35 est un liant hydraulique routier HRB 32.5 E composé de 55% de clinker et de 45% de pouzzolanes naturelles.

Le PHOCAL C15 est un liant hydraulique routier HRB 32.5 E composé de 47% de clinker, de 15 % de chaux et de 45% de pouzzolanes naturelles.

Le PHONOS est un liant hydraulique CEM II/B-Q 45.2 N composé de 75% de clinker et de 25% de pouzzolanes naturelles.

Les fiches Produits des Liants utilisés sont fournies à l'annexe 2.

### **3.1.2/ Dimensions et modalités de préparation des éprouvettes**

Le mélange du sol avec les liants a été réalisé conformément aux modalités décrites dans la norme NF P 94-093 [18].

Concernant les mesures de résistance en compression simple ( $R_c$ ), elles ont été réalisées sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 10 cm par 20 cm de hauteur à une compacité visée de 98.5 %  $\rho_{OPN}$  préparées par compactage statique [19]

Concernant les mesures de résistance en compression diamétrale ( $R_{tB}$ ,  $E_{tB}$ ), elles ont été réalisées sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 10 cm par 10 cm de hauteur à une compacité visée de 96 %  $\rho_{OPN}$  préparées par compactage statique [20]

Pour l'ensemble des éprouvettes la teneur en eau de compactage a été  $W=W_{OPN}+1$ .

Pour chacune des caractéristiques mécaniques déterminées, quatre mesures ont été réalisées pour la répétabilité.

## **3.2/ Loëss traité au ZIP 35**

### **3.2.1/ Loëss traité avec 5.5% de ZIP 35**

#### - Caractéristiques de mise en œuvre du mélange

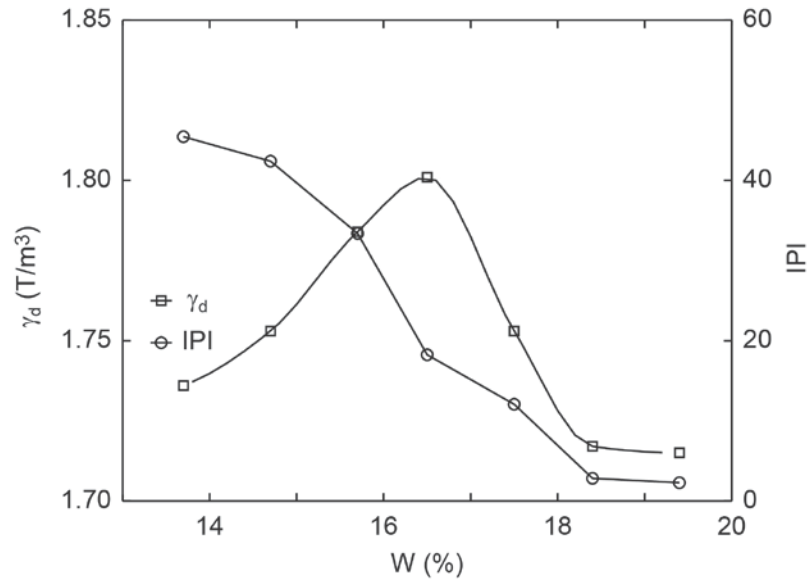
Les références de compactage à l'énergie Proctor normale sont :  $\gamma_s = 1.80 \text{ T/m}^3$  pour une teneur en eau  $W_{OPN}=16.5 \%$ . Les résultats d'essai sont synthétisés à la figure 5.

Par ailleurs,  $IPI_{\text{mat traité}} > 20$  pour  $W < 16.4 \%$  et la teneur en eau minimale de mise en œuvre est  $W_{0.9OPN} = 0.9 * 16.5 = 14.9 \%$

#### - Etude des performances mécaniques

#### Âge autorisant la circulation sur la couche traitée :

A 7 jours,  $R_{c7}=2.48 (0.04) \text{ MPa}$  et à 28 jours  $R_{c28} = 2.73 (0.06)$ . La couche de forme peut donc être circulée des 7 jours de cure. Compte tenu des valeurs, des essais à 2 ou 4 jours pourraient être envisagés pour déterminer l'âge minimal de circulation.



**Figure 5 :** mesures des densités Proctor Normal et Indices Portants Immédiats du matériau traité avec 5.5% de ZIP 35 en fonction de la teneur en eau.

Résistance à l’immersion au jeune âge :

Après 60 jours de cure, la résistance en compression est égale à  $R_{c60} = 3.95$  (0.49) MPa. La résistance en compression après 28 jours de cure normale suivis de 32 jours d’immersion totale dans de l’eau à 20 °C est  $R_{ci} = 3.41$  (0.39) MPa. Le rapport  $R_{ci}/R_{c60} = 0.86$ . Il est supérieur à 0.60. La résistance à l’immersion au jeune âge est jugée satisfaisante.

Performance escomptables à long terme et résistance au gel :

Les mesures de module et de résistance en compression diamétrale à 28 jours ( $R_{tB28}$ ) et 90 jours ( $R_{tB90}$ ) sont détaillées dans le tableau 5. Les incertitudes de mesures sont données entre parenthèses. Les matériaux sont classés dans l’abaque 1.

**Tableau 5 :** Performances mécaniques mesurée en traction indirecte pour le matériau traité avec 5.5% de ZIP35

28j		90j	
$R_{tB28}$ (MPa)	$E_{tB28}$ (MPa)	$R_{tB90}$ (MPa)	$E_{tB90}$ (MPa)
0.27 (0.02)	4749 (891)	0.37 (0.05)	4480 (870)

En ce qui concerne la résistance au gel, pour un temps de cure de 28 j,  $R_{tB} > 0.25$ . Au niveau du chantier, une durée d’environ 1 mois devra donc être prévue entre la mise en œuvre des matériaux et l’apparition possible du gel.

**3.2.2/ Loëss traité avec 7% de ZIP 35**

- Caractéristiques de mise en œuvre du mélange

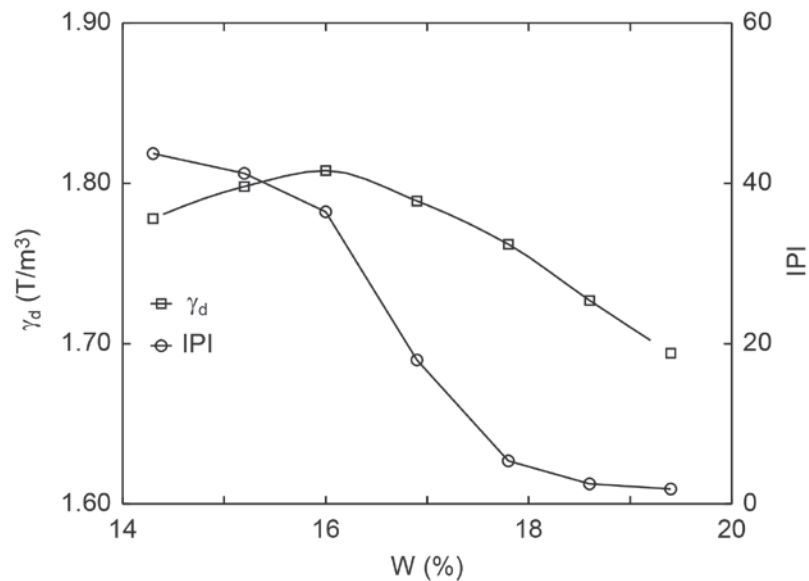
Les références de compactage à l’énergie Proctor normale sont :  $\gamma_s = 1.81$  T/m<sup>3</sup> pour une teneur en eau  $W_{OPN} = 16$  %. Les résultats d’essai sont synthétisés à la figure 7.

Par ailleurs,  $IPI_{mat\ traité} > 20$  pour  $W < 16.8$  % et la teneur en eau minimale de mise en œuvre est  $W_{0.9OPN} = 0.9 * 16 = 14.4$  %

- Etude des performances mécaniques

### Âge autorisant la circulation sur la couche traitée :

A 7 jours,  $R_{c7}=2.79$  (0.17) MPa et à 28 jours  $R_{c28} = 2.90$  (0.09) MPa. La couche de forme peut donc être circulée des 7 jours de cure. Compte tenu des valeurs, des essais à 2 ou 4 jours pourraient être envisagés pour déterminer l'âge minimal de circulation.



**Figure 7 :** mesures des densités Proctor Normal et Indices Portants Immédiats du matériau traité avec 7% de ZIP 35 en fonction de la teneur en eau.

### Résistance à l'immersion au jeune âge :

Après 60 jours de cure, la résistance en compression est égale à  $R_{c60} = 3.92$  (0.19) MPa. La résistance en compression après 28 jours de cure normale suivis de 32 jours d'immersion totale dans de l'eau à 20 °C est  $R_{ci} = 4.2$  (0.14) MPa. Le rapport  $R_{ci}/R_{c60} = 1.07$ . Il est supérieur à 0.60. La résistance à l'immersion au jeune âge est jugée satisfaisante.

### Performance escomptables à long terme et résistance au gel :

Les mesures de module et de résistance en compression diamétrale à 28 jours ( $R_{tB28}$ ) et 90 jours ( $R_{tB90}$ ) sont détaillées dans le tableau 6 et les matériaux sont classés dans l'abaque 1.

**Tableau 6 :** Performances mécaniques mesurée en traction indirecte pour le matériau traité avec 7% de ZIP35

28j		90j	
$R_{tB28}$ (MPa)	$E_{tB28}$ (MPa)	$R_{tB90}$ (MPa)	$E_{tB90}$ (MPa)
0.32 (0.01)	5787 (3200)	0.46 (0.02)	7517 (2161)

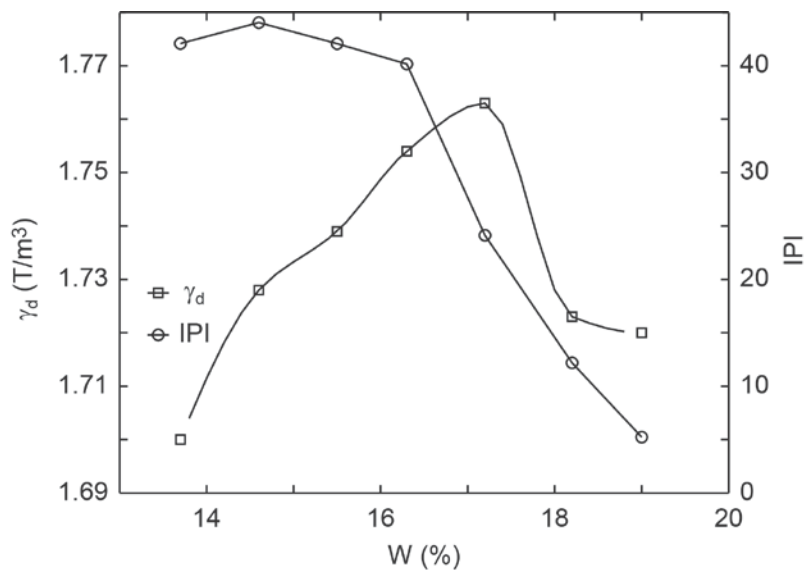
En ce qui concerne la résistance au gel, pour un temps de cure de 28 j,  $R_{tB} > 0.25$ . Au niveau du chantier, une durée à définir, inférieure à 1 mois pourra être prévue entre la mise en œuvre des matériaux et l'apparition possible du gel.

## **3.3/ Löss traité au PHOCAL C15**

### **3.3.1 / Löss traité avec 5.5% de PHOCAL C15**

- Caractéristiques de mise en œuvre du mélange

Les références de compactage à l'énergie Proctor normale sont :  $\gamma_s = 1.76 \text{ T/m}^3$  pour une teneur en eau  $W_{OPN}=17.2 \%$ . Les résultats d'essai sont synthétisés à la figure 8.



**Figure 8** : mesures des densités Proctor Normal et Indices Portants Immédiats du matériau traité avec 5.5% de PHOCAL C15 en fonction de la teneur en eau.

Par ailleurs,  $IPI_{mat\ traité} > 20$  pour  $W < 17.5\%$  et la teneur en eau minimale de mise en œuvre est  $W_{0.9OPN} = 0.9 * 17.3 = 15.6\%$

- Etude des performances mécaniques

Âge autorisant la circulation sur la couche traitée :

A 7 jours,  $R_{c7} = 1.55$  (0.07) MPa et à 28 jours  $R_{c28} = 2.17$  (0.3) MPa. La couche de forme peut donc être circulée des 7 jours de cure. Compte tenu des valeurs, des essais à 2 ou 4 jours pourraient être envisagés pour déterminer l'âge minimal de circulation.

Résistance à l'immersion au jeune âge :

Après 60 jours de cure, la résistance en compression est égale à  $R_{c60} = 2.78$  (0.08) MPa. La résistance en compression après 28 jours de cure normale suivis de 32 jours d'immersion totale dans de l'eau à 20 °C est  $R_{ci} = 2.58$  (0.05) MPa. Le rapport  $R_{ci}/R_{c60} = 0.93$ . Il est supérieur à 0.60. La résistance à l'immersion au jeune âge est jugée satisfaisante.

Performance escomptables à long terme et résistance au gel :

Les mesures de module et de résistance en compression diamétrale à 28 jours ( $R_{tB28}$ ) et 90 jours ( $R_{tB90}$ ) sont détaillées dans le tableau 3 et les matériaux sont classés dans l'abaque 1.

**Tableau 3** : Performances mécaniques mesurée en traction indirecte pour le matériau traité avec 5.5% de PHOCAL C15

28		90	
$R_{tB28}$ (MPa)	$E_{tB28}$ (MPa)	$R_{tB90}$ (MPa)	$E_{tB90}$ (MPa)
0.24 (0.04)	3899 (1190)	0.31 (0.04)	4689 (2452)

Pour un temps de cure de 28 j,  $R_{tB} < 0.25$  et pour un temps de cure de 90j,  $R_{tB} > 0.25$ . Au niveau du chantier, une durée à définir, comprise entre 1 et 3 mois devra être prévue entre la mise en œuvre des matériaux et l'apparition possible du gel.

### 3.3.2/ Loëss traité avec 7% de PHOCAL C15

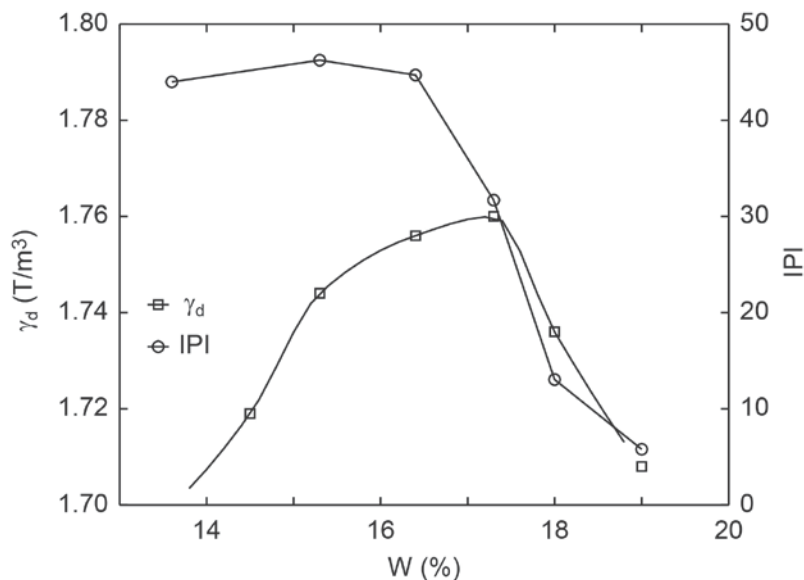
#### - Caractéristiques de mise en œuvre du mélange

Les références de compactage à l'énergie Proctor normale sont :  $\gamma_s = 1.76 \text{ T/m}^3$  pour une teneur en eau  $W_{OPN} = 17.3 \%$ . Les résultats d'essai sont synthétisés à la figure 9.

#### - Etude des performances mécaniques

#### Âge autorisant la circulation sur la couche traitée :

A 7 jours,  $R_{c7} = 1.81 (0.04) \text{ MPa}$  et à 28 jours  $R_{c28} = 2.43 (0.22) \text{ MPa}$ . La couche de forme peut donc être circulée des 7 jours de cure. Compte tenu des valeurs, des essais à 2 ou 4 jours pourraient être envisagés pour déterminer l'âge minimal de circulation.



**Figure 9 :** mesures des densités Proctor Normal et Indices Portants Immédiats du matériau traité avec 7% de PHOCAL C15 en fonction de la teneur en eau.

Par ailleurs,  $IPI_{\text{mat traité}} > 20$  pour  $W < 17.8\%$  et la teneur en eau minimale de mise en œuvre est  $W_{0.9OPN} = 0.9 * 17.3 = 15.6\%$

#### Résistance à l'immersion au jeune âge :

Après 60 jours de cure, la résistance en compression est égale à  $R_{c60} = 2.94 (0.15) \text{ MPa}$ . La résistance en compression après 28 jours de cure normale suivis de 32 jours d'immersion totale dans de l'eau à  $20^\circ\text{C}$  est  $R_{ci} = 2.73 (0.04) \text{ MPa}$ . Le rapport  $R_{ci}/R_{c60} = 0.93$ . Il est supérieur à 0.60. La résistance à l'immersion au jeune âge est jugée satisfaisante.

#### Performance escomptables à long terme et résistance au gel :

Les mesures de module et de résistance en compression diamétrale à 28 jours ( $R_{tB28}$ ) et 90 jours ( $R_{tB90}$ ) sont détaillées dans le tableau 8 et les matériaux sont classés dans l'abaque 1.

**Tableau 8 :** Performances mécaniques mesurée en traction indirecte pour le matériau traité avec 7% de PHOCAL C15

28j		90j	
$R_{tB28}$ (MPa)	$E_{tB28}$ (MPa)	$R_{tB90}$ (MPa)	$E_{tB90}$ (MPa)
0.29 (0.03)	3700 (680)	0.37 (0.03)	4765 (1184)

En ce qui concerne la résistance au gel, pour un temps de cure de 28 j,  $R_{tB} > 0.25$ . Au niveau du chantier, une durée d'environ 1 mois devra donc être prévue entre la mise en œuvre des matériaux et l'apparition possible du gel.

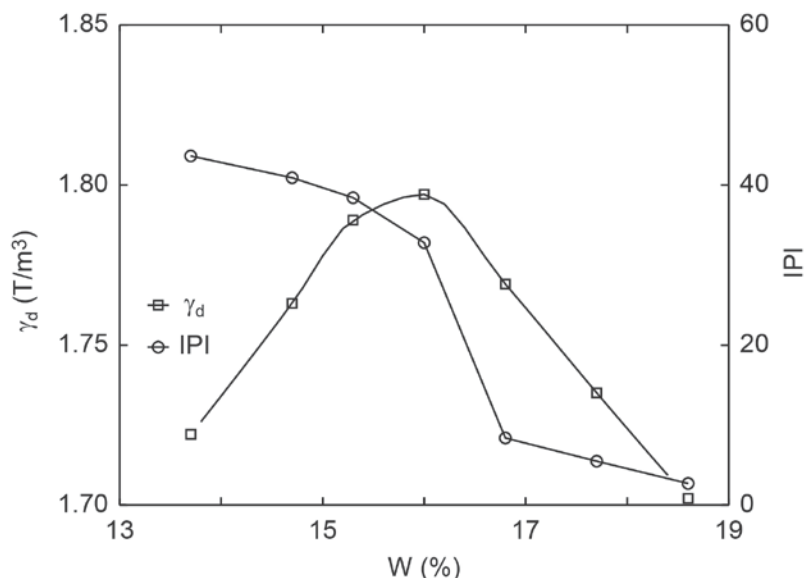
### 3.4/ Lœss traité au PHONOS

#### 3.4.1 / Lœss traité avec 5.5% de PHONOS

##### - Caractéristiques de mise en œuvre du mélange

Les références de compactage à l'énergie Proctor normale sont :  $\gamma_s = 1.80 \text{ T/m}^3$  pour une teneur en eau  $W_{OPN} = 16\%$ . Les résultats d'essai sont synthétisés à la figure 10.

Par ailleurs,  $IPI_{mat\ traité} > 20$  pour  $W < 16.5\%$  et la teneur en eau minimale de mise en œuvre est  $W_{0.9OPN} = 0.9 * 16 = 16.4\%$



**Figure 10 :** mesures des densités Proctor Normal et Indices Portants Immédiats du matériau traité avec 5.5% de PHONOS 35 en fonction de la teneur en eau.

##### - Etude des performances mécaniques

##### Âge autorisant la circulation sur la couche traitée :

A 7 jours,  $R_{c7} = 2.73$  (0.06) MPa et à 28 jours  $R_{c28} = 3.17$  (0.21) MPa. La couche de forme peut donc être circulée des 7 jours de cure. Compte tenu des valeurs, des essais à 2 ou 4 jours pourraient être envisagés pour déterminer l'âge minimal de circulation.

##### Résistance à l'immersion au jeune âge :

Après 60 jours de cure, la résistance en compression est égale à  $R_{c60} = 3.85$  (0.18) MPa. La résistance en compression après 28 jours de cure normale suivis de 32 jours d'immersion totale

dans de l'eau à 20 °C est  $R_{ci} = 3.62 (0.37)$  MPa. Le rapport  $R_{ci}/R_{c60} = 0.94$ . Il est supérieur à 0.60. La résistance à l'immersion au jeune âge est jugée satisfaisante.

Performance escomptables à long terme et résistance au gel :

Les mesures de module et de résistance en compression diamétrale à 28 jours ( $R_{tB28}$ ) et 90 jours ( $R_{tB90}$ ) sont détaillées dans le tableau 9 et les matériaux sont classés dans l'abaque 1.

**Tableau 9 :** Performances mécaniques mesurée en traction indirecte pour le matériau traité avec 5.5% de PHONOS

28j		90j	
$R_{tB28}$ (MPa)	$E_{tB28}$ (MPa)	$R_{tB90}$ (MPa)	$E_{tB90}$ (MPa)
0.33 (0.02)	4603 (359)	0.45 (0.07)	5754 (889)

En ce qui concerne la résistance au gel, pour un temps de cure de 28 j,  $R_{tB} > 0.25$ . Au niveau du chantier, une durée à définir, inférieure à 1 mois pourra être prévue entre la mise en œuvre des matériaux et l'apparition possible du gel.

### 3.4.2/ Loëss traité avec 7% de PHONOS

- Caractéristiques de mise en œuvre du mélange

Les références de compactage à l'énergie Proctor normale sont :  $\gamma_s = 1.80 \text{ T/m}^3$  pour une teneur en eau  $W_{OPN} = 15.7\%$ . Les résultats d'essai sont synthétisés à la figure 11.

Etude des performances mécaniques

Âge autorisant la circulation sur la couche traitée :

A 7 jours,  $R_{c7} = 2.88 (0.14)$  MPa et à 28 jours  $R_{c28} = 3.22 (0.31)$  MPa. La couche de forme peut donc être circulée des 7 jours de cure. Compte tenu des valeurs, des essais à 2 ou 4 jours pourraient être envisagés pour déterminer l'âge minimal de circulation.

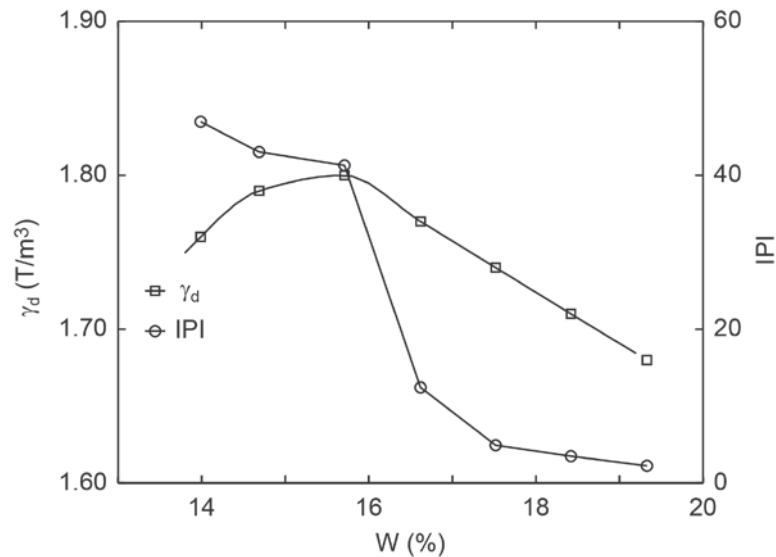
Résistance à l'immersion au jeune âge :

Après 60 jours de cure, la résistance en compression est égale à  $R_{c60} = 3.98 (0.08)$  MPa. La résistance en compression après 28 jours de cure normale suivis de 32 jours d'immersion totale dans de l'eau à 20 °C est  $R_{ci} = 4.11 (0.18)$  MPa. Le rapport  $R_{ci}/R_{c60} = 1.03$ . Il est supérieur à 0.60. La résistance à l'immersion au jeune âge est jugée satisfaisante.

Par ailleurs,  $IPI_{mat\ traité} > 20$  pour  $W < 16.4\%$  et la teneur en eau minimale de mise en œuvre est  $W_{0.9OPN} = 0.9 * 15.7 = 14.1\%$

Performance escomptables à long terme et résistance au gel :

Les mesures de module et de résistance en compression diamétrale à 28 jours ( $R_{tB28}$ ) et 90 jours ( $R_{tB90}$ ) sont détaillées dans le tableau 10 et les matériaux sont classés dans l'abaque 1.



**Figure 11** : mesures des densités Proctor Normal et Indices Portants Immédiats du matériau traité avec 7% de PHONOS en fonction de la teneur en eau.

**Tableau 10:** Performances mécaniques mesurée en traction indirecte pour le matériau traité avec 5.5% de PHONOS

28j		90j	
$R_{tB28}$ (MPa)	$E_{tB28}$ (MPa)	$R_{tB90}$ (MPa)	$E_{tB90}$ (MPa)
0.36 (0.02)	4160 (626)	0.49 (0.01)	6194 (938)

En ce qui concerne la résistance au gel, pour un temps de cure de 28 j,  $R_{tB} > 0.25$ . Au niveau du chantier, une durée à définir, inférieure à 1 mois pourra être prévue entre la mise en œuvre des matériaux et l'apparition possible du gel.

### 3.5/ Zones de classement des matériaux

La synthèse graphique des performances escomptables à long terme pour l'ensemble des formulations est présentée dans l'abaque 1 [3].

Pour l'ensemble des formulations, le couple ( $R_t$ ,  $E$ ) déterminé à 90j conduit au moins à un matériau de classe mécanique 5.

## 4/ Etude en fatigue

### 4.1/ Mesures préliminaires de résistance en compression simple ( $R_c$ , $E$ )

#### 4.1.1 Modalités d'essais

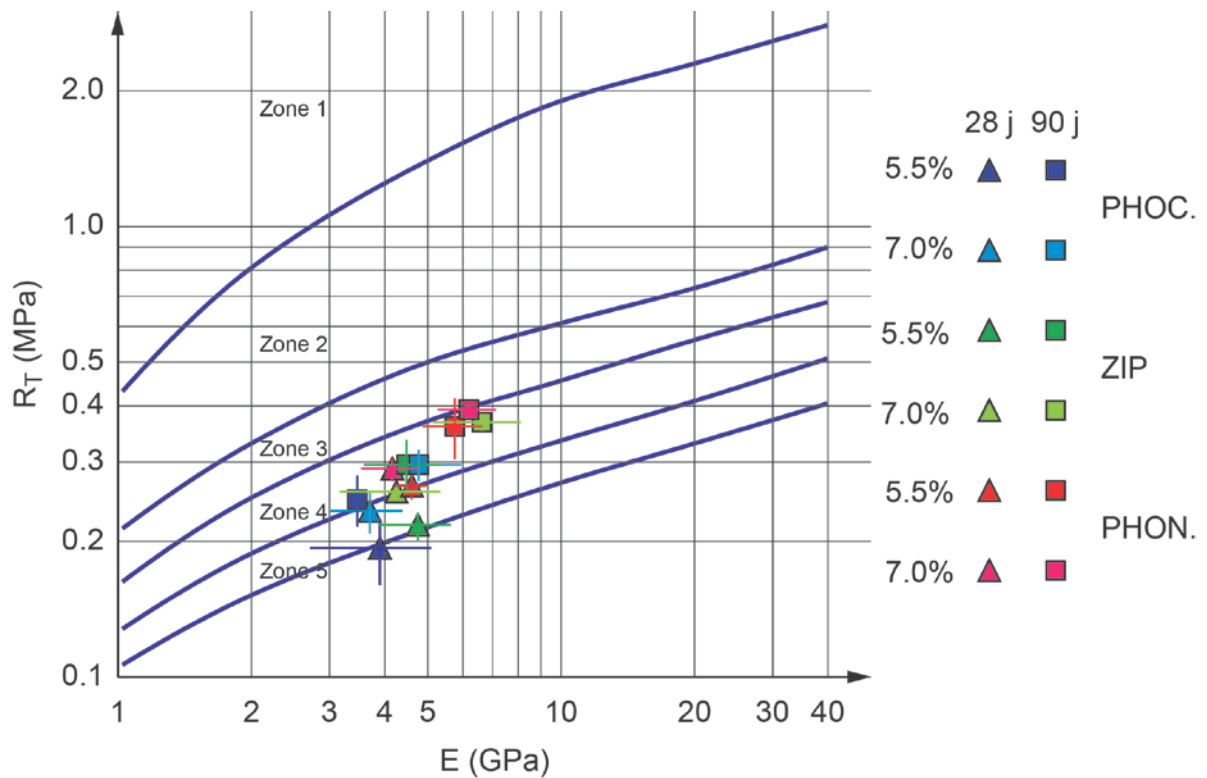
Comme précédemment, le mélange du sol avec les liants a été réalisé conformément aux modalités décrites dans la norme NF P 94-093 [18] et les mesures de résistance en compression simple ont été réalisées sur des éprouvettes cylindriques de diamètre 10 cm par 20 cm de hauteur à une compacité visée de 98.5 %  $\rho_{dOPN}$  ( $W = W_{OPN} + 1$ ) préparées par compactage statique [19]. Le module mesuré  $E$ , correspond au module sécant à 30% de la rupture.

#### 4.1.2 Résultats

Les résultats des essais sont fournis dans le tableau 11. Il est tout d'abord intéressant de constater l'importante corrélation qui existe entre la mesure du  $R_c$  et la mesure du module  $E$

indépendamment de la formulation (liant et dosage) et du temps de cure. Le coefficient de détermination liant ces deux variables est  $R^2=0.93$  (Figure 12).

Cette corrélation fortement significative autorise l'étude d'un seul des deux paramètres et pour la suite on retient la variable  $R_c$ .



**Abaque 1 :** Zones de classement des matériaux en fonction de leur résistance en traction ( $R_T=0.8 R_{tB}$ ) et du module  $E$  [3].

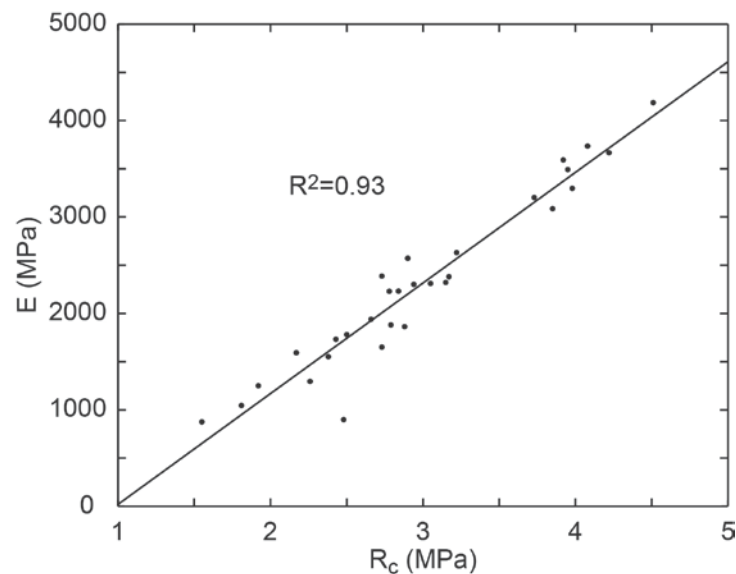
Dans tous les cas, les résistances en compression évoluent entre 7 jours et 90 jours. Le matériau formulé avec le PHOCAL présente les performances les moins élevées. Avec 5.5% de liant, on observe une augmentation de 1.55 MPa à 2.84 MPa ; avec 7%, on observe une augmentation de 1.81 MPa à 3.15 MPa. Dans les deux cas, malgré des performances moins bonnes, la formation et le développement de prises cimentaires se font, expliquant l'augmentation de  $R_c$ .

**Tableau 11 :** Résultats des essais de mesure en compression simple ( $R_c$  et  $E$ )

Formulation		ZIP 35		PHOCAL C15		PHONOS	
Tps de cure (j)		5.5	7	5.5	7	5.5	7
7	$R_c$ (MPa)	2.48 (0.04)	2.79 (0.17)	1.55 (0.07)	1.81 (0.04)	2.73 (0.06)	2.88 (0.14)
	$E$ (MPa)	899 (139)	1881 (165)	875 (114)	1046 (19)	1654 (369)	1863 (59)
14	$R_c$ (MPa)	2.38 (0.02)	2.66 (0.05)	1.92 (0.04)	2.26 (0.06)	2.50 (0.10)	3.05 (0.16)
	$E$ (MPa)	1551 (57)	1940 (232)	1250 (376)	1296 (72)	1781 (81)	2311 (82)
28	$R_c$ (MPa)	2.73 (0.06)	2.90 (0.09)	2.17 (0.30)	2.43 (0.22)	3.17 (0.21)	3.22 (0.31)
	$E$ (MPa)	2387 (121)	2573 (195)	1592 (188)	1732 (167)	2380 (218)	2631 (205)
60	$R_c$ (MPa)	3.95 (0.49)	3.92 (0.19)	2.78 (0.08)	2.94 (0.15)	3.85 (0.18)	3.98 (0.08)
	$E$ (MPa)	3492 (282)	3593 (339)	2230 (220)	2302 (67)	3086 (398)	3298 (230)
90	$R_c$ (MPa)	3.73 (0.23)	4.51 (0.28)	2.84 (0.06)	3.15 (0.07)	4.08 (0.27)	4.22 (0.30)
	$E$ (MPa)	3202 (210)	4186 (210)	2232 (425)	2323 (79)	3735 (144)	3667 (167)

Concernant les matériaux formulés avec le ZIP 35, leur évolution paraît plus lente au départ. Dans les deux cas, les valeurs  $R_c$  à 14 jours sont inférieures aux valeurs de  $R_c$  à 7 jours (respectivement

2.38 et 2.66 vs 2.48 et 2.79 MPa). Les performances augmentent ensuite jusqu'à 60 jours, avec des performances équivalentes indépendamment du dosage (3.95 et 3.92 MPa). Puis, avec 5.5% de liant on observe une baisse des performances (3.73), alors qu'avec 7% de liant, les performances continuent d'augmenter (4.51). Cette valeur est d'ailleurs la plus élevée mesurée sur l'ensemble des formulations. Comme précédemment, l'évolution des performances entre 7 et 90 j de cure démontre la formation et l'évolution de prises cimentaires.



**Figure 12 :** Relation entre les valeurs de module E et les valeurs de résistance en compression Rc

Enfin, concernant les matériaux formulés avec le PHONOS, ils présentent les performances les plus élevées au départ (respectivement 2.73 pour 5.5% et 2.88 MPa pour 7%). Dans le cas de la formulation à 5.5%, on observe une baisse à 14 jours (2.50 MPa) puis les performances augmentent jusqu'à 4.08 MPa à 90 jours. Dans le cas de la formulation à 7%, l'augmentation est monotone, jusqu'à 4.22 MPa à 90 jours.

Après 90 jours de cure, les formulations peuvent être classées ainsi : 7% ZIP35 > 7% PHONOS > 5.5% PHONOS > 5.5% ZIP35 > 7% PHOCAL > 5.5% PHOCAL. Néanmoins, compte tenu des évolutions et incertitudes mesurées avec du ZIP35, il est impossible de conclure directement quant à la formulation à retenir.

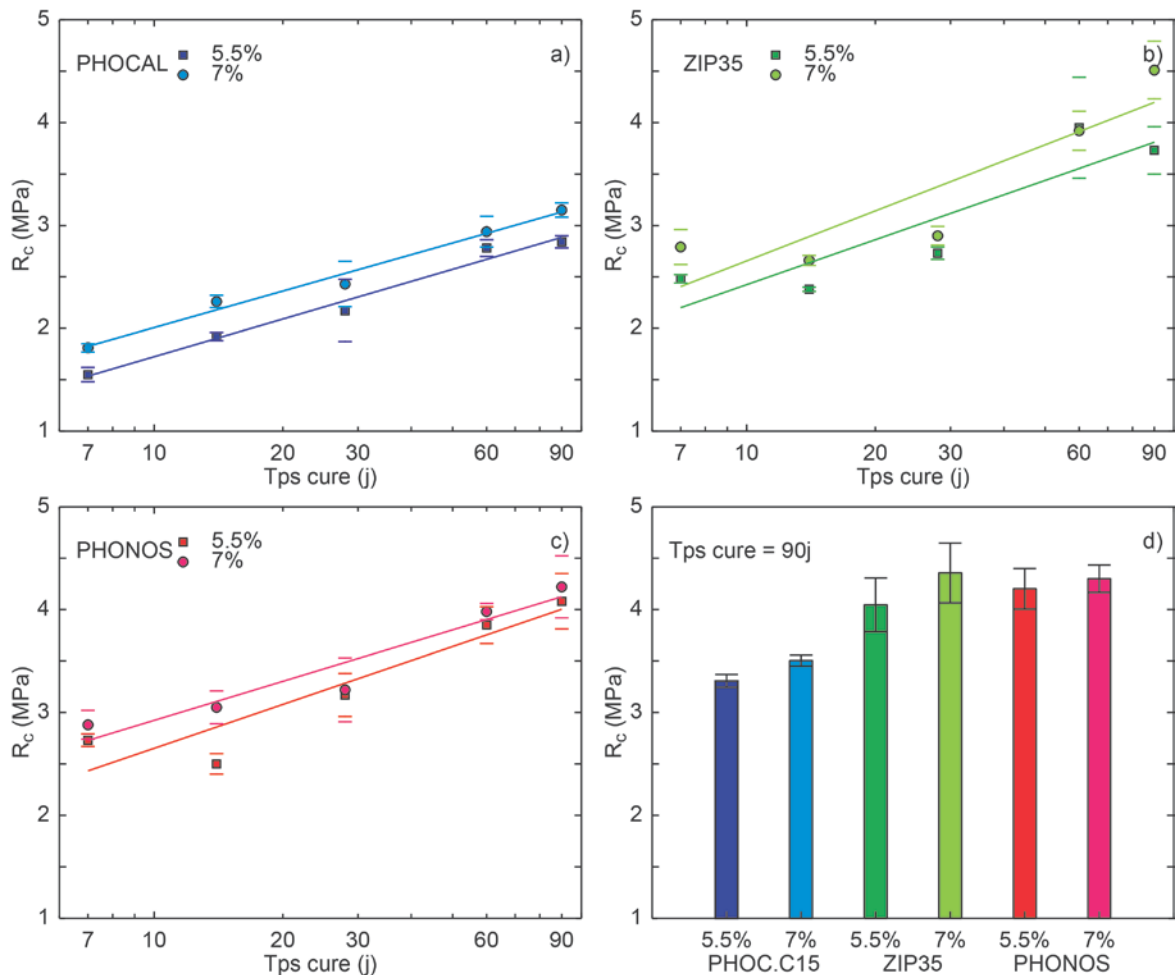
Pour approfondir cette analyse, une interpolation des données est faite. D'une manière générale pour les matériaux hydrauliques, il est classique [21] d'exprimer l'évolution de la variable Rc en fonction du temps sous la forme d'une loi semi logarithmique :

$$R_c(t) = a + b \cdot \log_{10}(t),$$

où Rc(t) est la valeur de la résistance en compression après t jours de cure.

Cette approche est pertinente pour l'ensemble des formulations étudiées (Figure 13). L'interpolation des mesures et la prise en compte de l'incertitude après 90 jours de cure (Figure 13 et tableau 12 permettent de modifier le classement des formulations : 7% PHONOS > 7% ZIP35 > 5.5% PHONOS > 5.5% ZIP35 > 7% PHOCAL > 5.5% PHOCAL. Ce classement est cohérent avec les mesures de résistance en traction indirecte (Abaque 1).

Par ailleurs, pour les formulations avec le liant PHONOS, en termes de pourcentage, il apparaît que le rapport,  $R_c(5.5\%) / R_c(7\%) = 0.97$ .



**Figure 13 :** Mesures des résistances en compression ( $R_c$ ) des matériaux traités avec 5.5% et 7% de a) PHOCAL C15, b) ZIP35 et c) PHONOS. d). Résultats des interpolations des mesures de  $R_c$  pour un temps de cure de 90 jours

Compte tenu de l'ensemble de ces observations, et pour être cohérent avec les pratiques courantes en matière de terrassement, le matériau traité avec 5.5% de PHONOS est le matériau retenu pour l'étude en fatigue.

**Tableau 12 :** Interpolation des mesures de résistance en compression simple après 90 jours de cure

Formulation	ZIP 35		PHOCAL C15		PHONOS	
	5.5	7	5.5	7	5.5	7
$R_c$ (MPa)	3.81 (0.33)	4.20 (0.36)	2.88 (0.08)	3.13 (0.08)	4.00 (0.25)	4.12 (0.17)

## 4.2/ Mesures de fatigue mécanique

### 4.2.1 Principe de l'essai

Les mesures de fatigue mécaniques ont été réalisées suivant le mode dit de « flexion 4 points ». Le principe de l'essai consiste à centrer un barreau de matériau ( $h*b*H=10\text{ cm}*10\text{ cm}*40\text{ cm}$ ) sur deux supports distants de  $L=30\text{ cm}$  (figure 14). Sur la face supérieure du barreau, une charge  $F$  est appliquée via deux points d'application distants de  $l=10\text{ cm}$ . Cette charge génère une contrainte de traction dans la partie inférieure du barreau. Les lois de la Résistance des Matériaux permettent de relier de manière analytique la charge appliquée sur l'éprouvette et la contrainte de traction [22] avec I moment quadratique de la section :

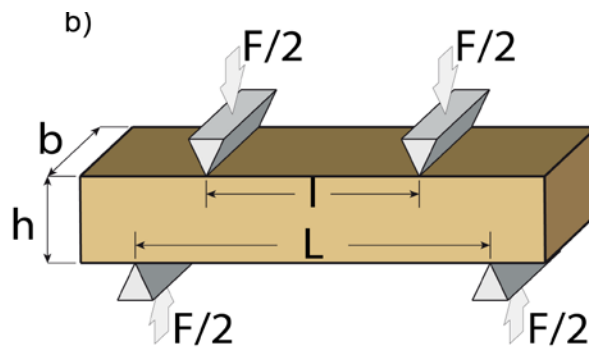
$$\sigma_F = Fh(L-l/2)/4I$$

$$\text{avec } I = bh^3/12$$

La charge appliquée est tout d'abord monotone pour le calcul de la résistance en flexion. Dans un second temps, elle est cyclique pour mesurer le nombre de cycles qui amènent à la rupture pour un niveau de contrainte donné.

Ce type d'essai est communément utilisé pour mesurer la fatigue des bétons [23, 24], des graves traitées [25, 26] et des sols traités [27-29].

Sur la face inférieure, entre les points d'application, le champ de contrainte généré est homogène et permet ainsi une mesure précise du module d'Young  $E$  grâce à l'utilisation de jauges de déformations en liant la contrainte à la déformation suivant la loi de Hooke  $\sigma = E\varepsilon$ .



**Figure 14 :** Représentation schématique du test de flexion 4 points [22]

#### 4.2.2 Préparation des éprouvettes et modalités d'essais

Comme précédemment, le mélange du sol avec les 5.5% de PHONOS a été réalisé conformément aux modalités décrites dans la norme NF P 94-093 [11].

En accord avec les modalités retenues pour les essais dimensionnant en traction brésilienne, les éprouvettes ont été réalisées dans des moules parallélépipédique en acier indéformable, à une compacité visée de 96 %  $\rho_{d_{OPN}}$  à une teneur en eau  $W = W_{OPN} + 1$  et préparées par compactage pseudo double statique [19]. Les éprouvettes sont extraites du moule par pistonage, puis conservées à une température de 20 °C dans un film plastique afin de conserver la teneur en eau constante pendant 90 jours.

Pour mesurer la force menant à la rupture en flexion monotone  $F_F$ , trois éprouvettes ont été testées avec une vitesse de chargement imposée de 0.8 mm/min. Les mesures de déformation ont été réalisées avec deux jauges HBM LY41 20/120 ( $R = 120 \Omega$ , taille de grille de 2.0 cm) par éprouvette.

Seize éprouvettes ont été soumises à un chargement cyclique entre 0.4 kN (0.12 MPa) et  $F_{var}$  à une fréquence de 50 Hz. Le niveau de chargement  $F_{var}$  a varié de 60% à 25% de la force menant à la rupture en flexion monotone  $F_F$  avec un pas de 5%. Deux éprouvettes ont été testées à chaque niveau de chargement.

#### 4.2.3 Résultats

- Mesures en flexion monotone

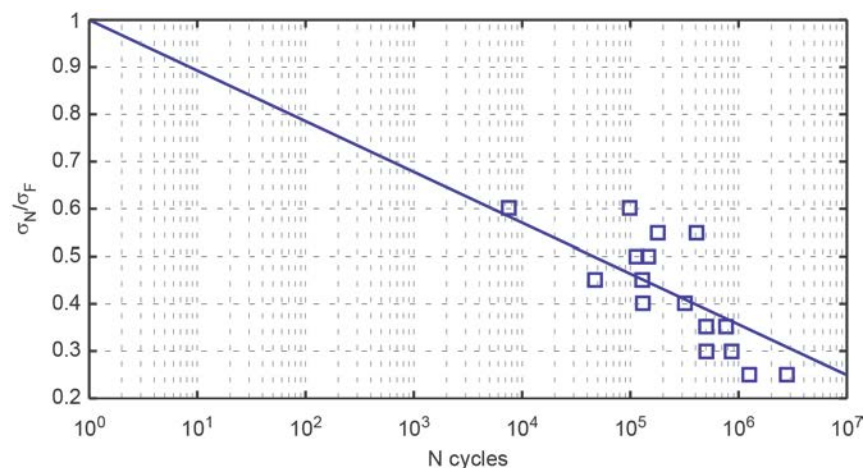
Les trois éprouvettes testées en flexion monotone ont cassé correctement (figure 15), c'est-à-dire sous la zone de chargement. En moyenne  $F_F = 3.04$  (0.13) kN, soit  $\sigma_F = 0.91$  (0.04) MPa et  $E = 2968$  (348) MPa.



**Figure 15 :** Dispositif expérimental et mode de rupture attendu des éprouvettes

#### - Mesures cycliques

Les seize éprouvettes testées en flexion cyclique ont cassé correctement (figure 15). Ces mesures mènent à la droite de fatigue présentée à la figure 16. Un rapide examen visuel montre que la représentation linéaire des données est pertinente. Cette droite s'exprime sous la forme  $\sigma/\sigma_F = 1 + \beta \log_{10} N$ . L'ensemble des paramètres est synthétisé dans le tableau 13.



**Figure 16 :** Droite de fatigue du matériau traité

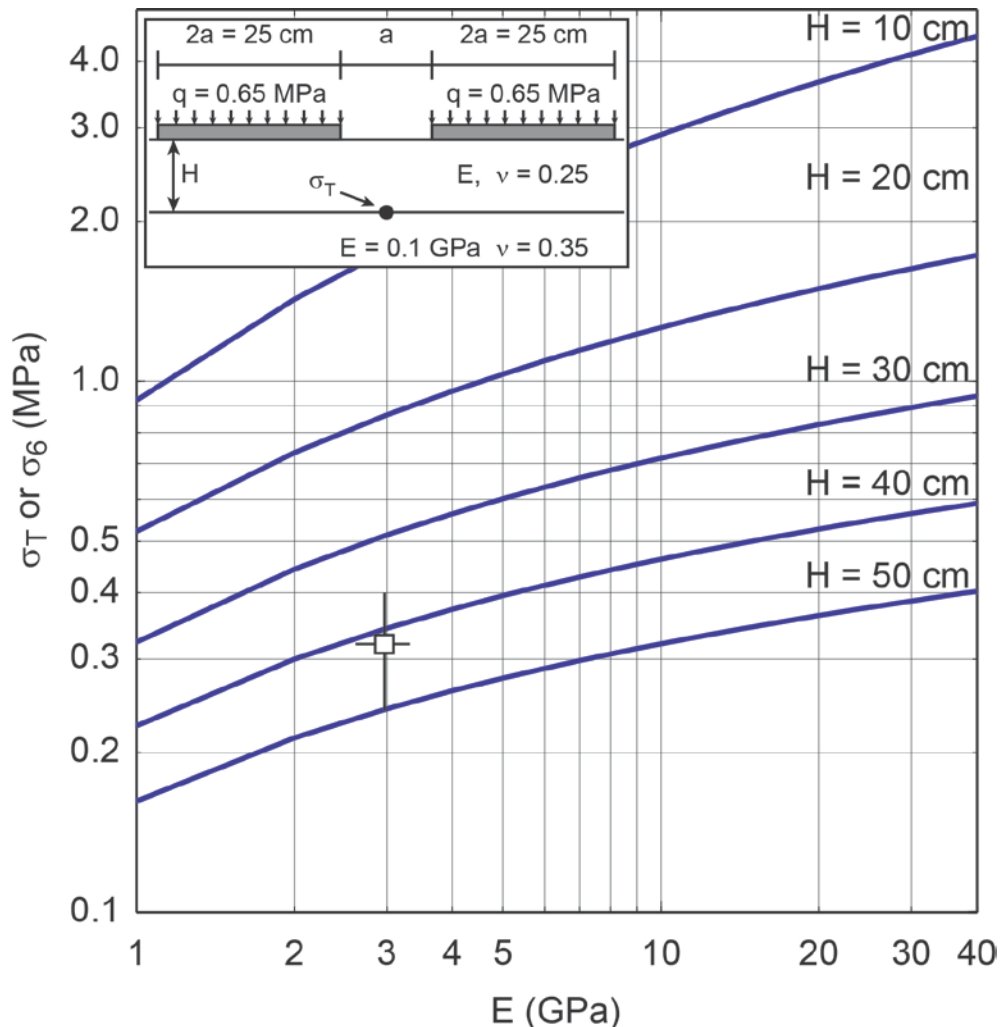
La pente de la droite de fatigue est  $\beta = -0.11$  soit  $-1/\beta = 9.3$ . C'est une valeur assez faible, les résultats attendus pour le matériau traités au liant hydraulique étant en général de l'ordre de  $-1/\beta = 12$  en flexion uniaxiale [30]. Il en résulte une valeur interpolée de  $\sigma_6$  de 0.32 (0.08) et une endurance  $e = \sigma_6/\sigma_F = 0.36$  inférieure à la valeur classique de 0.5 pour ce paramètre. Enfin, l'incertitude sur le nombre de cycle menant à la rupture est  $SN=0.7$ . Il est lui aussi légèrement inférieur à la valeur de 0.8 proposé dans les guides de référence [31], ce qui traduit un comportement un petit plus homogène qu'attendu.

**Tableau 13 :** Synthèse des mesures de flexion

$\sigma_F$ (MPa)	$E$ (MPa)	$-1/\beta$	$\sigma_6$ (MPa)	$e$	SN
0.91 (0.04)	2968 (348)	9.3	0.32 (0.08)	0.36	0.7

#### 4.2.4 Application à l'utilisation en assises de chaussées

La mesure du couple ( $\sigma_6$ ,  $E$ ) permet de déterminer l'Indice de Qualité Epaisseur (IQE) du matériau [32]. Le classement est présenté dans l'abaque 2. L'IQE du lœss traité avec 5.5% de PHONOS est de l'ordre de 40. D'un point de vue utilisation en assises, en liant le paramètre  $\sigma_6$  avec  $R_T$  via la relation  $\sigma_6=0.95 R_T$ , il vient  $R_T=0.26$  MPa. Ce type de matériaux est défini comme un SOL T1 [33] et son utilisation en couche de fondation d'assises de chaussées est autorisée à l'heure actuelle pour des trafics T4 (<50 poids lourds par jour et par sens à la mise en service).



**Abaque 2 :** Abaque pour la détermination Indice Qualité Epaisseur des matériaux en fonction du couple ( $\sigma_6$ ,  $E$ ).

## 5/ Conclusions

Les performances mécaniques des lœss traités avec trois liants hydrauliques de l'entreprise HAURI (PHONOS, ZIP35 et PHOCAL C15) et deux dosages différents (5.5% et 7%), soit six formulations, sont satisfaisantes pour une utilisation en couche de forme d'infrastructures conformément aux règles en vigueur.

Une étude en fatigue mécanique approfondie pour une des formulations (5.5% de PHONOS) montre des résultats satisfaisants pour une utilisation en couche de fondation d'assises de chaussées à faible trafic (jusqu'à T4).

Enfin, concernant les perspectives de ces travaux, cette étude de fatigue mécanique fournit les paramètres mécaniques nécessaires pour la prise en compte la couche de forme dans le dimensionnement d'une structure routière.

## 6/ BIBLIOGRAPHIE

[1] SETRA-LCPC. Réalisation des remblais et des couches de forme, Guide Technique. SETRA-LCPC. 2000.

[2] NF P11-300, 1992. Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

[3] SETRA-LCPC. Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation des remblais et des couches de forme, Guide Technique. SETRA-LCPC. 2000

[4] Q. Liu, E. Schlangen, M. van de Ven, G. van Bochove, J. van Montfort. Evaluation of the induction healing effect of porous asphalt concrete through four point bending fatigue test. Constr. Build. Mat. 2012;29:403-409

[5] W. Wang, S. Wu, H. Dai. Fatigue behavior and life prediction of carbon fiber reinforced concrete under cyclic flexural loading. Mat. Sci. Eng. A. 2006;436:347-351.

[6] M. Frechen, E.A.Oches,K.E.Kohfeld. Loess in Europe – mass accumulation rates during the Last Glacial Period. Quat. Sci. Rev. 2003;22:1835-1857

[7] D. Haase, J. Fink, G. Haase, R. Ruske, M. Pecs, H. Richter, M. Altermann, K.-D. Jäger. Loess in Europe—its spatial distribution based on a European Loess Map, scale 1:2,500,000. Quat. Sci. Rev. 2007;26:1301–1312

[8] M. Vriend, M.A. Prins. Calibration of modelled mixing patterns in loess grain-size distributions: an example from the north-eastern margin of the Tibetan Plateau, China. Sedimentology. 2005;52(6):1361-1374.

[9] K. Yu, K. Hartmann, V. Nottebaum, G. Stauch, H. Lu, C. Zeeden, S. Yi, B. Wünnemann, F. Lehmkuhl. Discriminating sediment archives and sedimentary processes in the arid endorheic Ejina Basin, NW China using a robust geochemical approach. J. Asian Earth Sci. 2016;119:128-144.

[10] Notice Géologique n°272, Strasbourg – Bas Rhin. BRGM. 1968.

[11] NF P 94-056, 1996, Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique - Méthode par tamisage à sec après lavage.

[12] NF P 94-057, 1992, Sols : reconnaissance et essais - Analyse granulométrique des sols - Méthode par sédimentation.

[13] A. Atterberg. Die rationale Klassifikation der Sande und Kiese. Chem Ztg 1905;29:195–198.

[14] NF P94-051, 1993. Soils: investigation and testing. Determination of Atterberg's limits. Liquid limit test using cassagrande apparatus. Plastic limit test on rolled thread.

- [15] NF P 94-068, 1998. Sols : reconnaissance et essai – Mesure de la capacité d’adsorption de bleu de méthylène d’un sol ou d’un matériau rocheux. Détermination de la valeur de bleu de méthylène d’un sol ou d’un matériau rocheux par l’essai à la tâche.
- [16] XP P 94-047, 1998. Sols : reconnaissance et essai – Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d’un matériau.
- [17] AFNOR 1991, NF P94-054. Sols : reconnaissance et essais - Détermination de la masse volumique des particules solides des sols - Méthode du pycnomètre à eau.
- [18] NF P94-093, 2014. Sols : reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor Normal - Essai Proctor modifié.
- [19] NF EN 13286-41, 2003. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques. Partie 41 : Méthode d’essai pour la détermination de la résistance à la compression des mélanges traités aux liants hydrauliques.
- [20] NF EN 13286-42, 2003. Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques. Partie 41 : Méthode d’essai pour la détermination de la résistance à la traction indirecte des mélanges traités aux liants hydrauliques.
- [21] D. X. Xuan, L.J.M. Houben, A.A.A. Molenaar, Z.H. Shui. Mechanical properties of cement-treated aggregate material – A review. Mater. Design 2012;33:496-502
- [22] M. Preteseille, T. Lenoir. Structural test at the laboratory scale for the utilization of stabilized fine-grained soils in the subgrades of High Speed Rail infrastructures: experimental aspects, Int. J. Fatigue 82 (2016) 505–513.
- [23] L.P. Guo, W. Sun, K.R. Zheng, H.J. Chen, B. Liu. Study on the flexural fatigue performance and fractal mechanism of concrete with high proportions of ground granulated blast-furnace slag. Cem. Concr. Res. 2007;37(2):242–50.
- [24] Leung CKY, Cheung YN, Zhang J. Fatigue enhancement of concrete beam with ECC layer. Cem. Concr. Res. 2007;37(5):743–50.
- [25] Sobhan K, Das BM. Durability of soil-cements against fatigue fracture. J Mater. Civ. Eng. 2007;19(1):26–32.
- [26] T.L. Yu, C.Y. Li, J.Q. Lei, H.X. Zhang. Fatigue of concrete beams strengthened with glass-fiber composite under flexure. J. Compos. Constr. 2011;15(4):557–64.
- [27] Larson TJ, Nussbaum PJ. Fatigue of soil-cement. J. PCA Res. Dev. Lab. 1967;9:37–59.
- [28] Bofinger HE. The fatigue behavior of soil-cement. Aust. Road. Res. Board 1965;2(4):12–20.
- [29] Shen C, Mitchell JK. Behavior of soil-cement in repeated compression and flexure. Highway Res. Rec. 1966;128:68–100.
- [30] SETRA-LCPC. Conception et dimensionnement des structures de chaussée, SETRA-LCPC. 1994.
- [31] SETRA-LCPC. Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques – Application à la réalisation assises de chaussées, Guide technique, SETRA-LCPC. 2007.

[32] Bonnot J. Influence des variations des propriétés mécaniques sur la qualité des couches de base traitées aux liants hydrauliques. Bull liaison Lab. P&C 1973;64.

[33] NF EN 14227-15, 2016 Mélanges traités aux liants hydrauliques – Spécifications – Partie 15 : Sols traités aux liants hydrauliques

## **7/ ANNEXES**

Annexe 1 : Identification GTR des échantillons représentatifs des sols du gisement

Annexe 2 : Fiches Produit

Annexe 3 : Implantation des sondages à la pelle sur le site de Geispolsheim RD401/RD84

Annexe 4 : Sondage F1 à sondage F18

Annexe 5 : Procès-verbaux d'essais

# **ANNEXE I**

Identification GTR des échantillons  
représentatifs des sols du gisement

N° échantillon	Nature	Wn (%)	Passant à 0,08 mm	Passant à 2 mm	Passant à 2 mm	VBS	Sondage	Profondeur
T15060	Loess	16,8	93,8	98,9	100	2,29	F14	2,5
T15048	Loess	16,6	93,9	97,7	100	2,21	F11	1,5
T15033	Loess	18,4	91,2	97,5	100	2,09	F7	3
T15044	Loess	19,3	92	98,6	100	2	F10	2
T15072	Loess	18,3	94,9	98	100	1,94	F17	2,5
T15035	Loess	18,6	88,6	100	100	1,91	F8	1,5
T15052	Loess	17,5	89,3	98,7	100	1,89	F12	2
T15031	Loess	19,1	87,5	89,4	100	1,88	F7	2
T15010	Loess	18,5	86,6	92,7	96,7	1,87	F2	2,5
T15008	Loess	18,8	90,3	100	100	1,86	F2	1,5
T15068	Loess	17,8	94,5	99,3	100	1,82	F16	2,5
T15028	Loess	17,8	93,6	98,5	99	1,8	F6	2,5
T15064	Loess	18,8	92,1	95,6	100	1,79	F15	2,5
T15046	Loess	21,1	90,6	98,2	100	1,77	F11	0,5
T15013	Loess	19,4	96	97,7	98,9	1,76	F3	2
T15038	Loess	21,1	94	98,8	100	1,74	F9	1,5
T15040	Loess	16,5	79,6	98,8	100	1,74	F9	2,5
T15051	Loess	17,4	91	97,1	97,3	1,73	F12	1,5
T15018	Loess	17,8	93,4	97,4	100	1,73	F4	2,5
T15070	Loess	22,5	88,4	96,9	100	1,72	F17	1,5
T15058	Loess	21,6	93,4	98,5	100	1,68	F14	1,5
T15050	Loess	21,3	90	96,3	97,9	1,63	F12	1
T15023	Loess	19,2	90,5	99,7	100	1,62	F5	2,5
T15055	Loess	18,6	91	97	100	1,62	F13	2
T15005	Loess	19,2	91,5	96	100	1,61	F1	2
T15036	Loess	18,5	85,6	100	100	1,59	F8	2
T15026	Loess	20,1	86,2	95	100	1,58	F6	1,5
T15027	Loess	20,65	89,75	99,8	100	1,545	F6	2
T15075	Loess	19,6	95,1	98,3	98,6	1,52	F18	2
T15004	Loess	17,8	90,2	99,8	100	1,5	F1	1,5
T15042	Loess	22	87,8	92,4	93,3	1,47	F10	1
T15066	Loess	21,9	95,8	99,6	100	1,47	F16	1,5
T15074	Loess	19,9	86,8	94,1	95,2	1,46	F18	1,5
T15053	Loess	20,5	89,7	97,1	100	1,43	F13	1
T15016	Loess	21,6	92,9	96,2	98,8	1,39	F4	1,5
T15057	Loess	23,3					F14	1
T15056	Loess	22,3					F14	0,5
T15030	Loess	22					F7	1,5
T15012	Loess	21,5					F3	1,5
T15043	Loess	21,5					F10	1,5
T15063	Loess	20,4					F15	2
T15067	Loess	20,3					F16	2
T15054	Loess	20,2					F13	1,5
T15047	Loess	19,9					F11	1
T15017	Loess	19,7					F4	2
T15071	Loess	19,7					F17	2
T15076	Loess	19,7					F18	2,5
T15019	Loess	18,8					F4	3
T15059	Loess	18,8					F14	2
T15049	Loess	18,3					F11	2
T15032	Loess	18,1					F7	2,5
T15045	Loess	17,6					F10	2,3
T15022	Loess	17,5					F5	2
T15024	Loess	17,4					F5	2,5
T15009	Loess	17					F2	2
T15039	Loess	16,9					F9	2

	Nature	Passant à 0,08 mm	Passant à 2 mm	Passant à 5 mm	VBS
<b>MINI</b>	16,5	0,1	2,0	5,0	1,39
<b>MAXI</b>	23,3	96,0	100,0	100,0	2,29
<b>MOYENNE</b>	19,4	88,3	94,8	96,7	1,73
<b>ETENDUE DES MESURES</b>	6,8	95,9	98,0	95,0	0,90
<b>ETENDUE RELATIVE</b>	35,1%	108,7%	103,4%	98,3%	51,9%

N° échantillon	Nature	Wn (%)	Passant à 0,08 mm	Passant à 2 mm	Passant à 2 mm	VBS	Sondage	Profondeur
T15061	Limon	22,7	97,8	99,8	100	4,82	F15	1
T15007	Limon	21,3	97,9	100	100	3,83	F2	1
T15025	Limon	22,5	97,8	99,8	100	3,8	F6	1
T15011	Limon	22,6	97		99,5	3,75	F3	1
T15034	Limon	20,6	97,5	100	100	3,39	F8	1
T15003	Limon	20,4	93,6	99,6	100	3,11	F1	1
T15069	Limon	13,3	96	99,4	100	3,08	F17	1
T15041	Limon	21,1	92,7	98,6	100	2,85	F10	0,5
T15015	Limon	23	96,5		99,9	1,64	F4	1
T15020	Limon	23,3					F5	1
T15029	Limon	21,8					F7	1
T15073	Limon	21,6					F18	1
T15065	Limon	20,7					F16	1
T15037	Limon	20,2					F9	0,5
T15006	Limon	17,9	95,3				F2	0,5

	Nature	Passant à 0,08 mm	Passant à 2 mm	Passant à 2 mm	VBS
<b>MINI</b>	<b>13,3</b>	<b>92,7</b>	<b>98,6</b>	<b>99,5</b>	<b>1,6</b>
<b>MOYENNE</b>	<b>20,9</b>	<b>96,2</b>	<b>99,6</b>	<b>99,9</b>	<b>3,4</b>
<b>ECART TYPE</b>	<b>2,5</b>	<b>1,8</b>	<b>0,5</b>	<b>0,2</b>	<b>0,9</b>
<b>ETENDUE RELATIVE</b>	<b>47,9%</b>	<b>5,4%</b>	<b>1,4%</b>	<b>0,5%</b>	<b>94,5%</b>
<b>MAXI</b>	<b>23,3</b>	<b>97,9</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>4,8</b>

# **ANNEXE II**

## Fiches Produit

# FICHE PRODUIT

LIANT ROUTIER HRB 32,5 E / K47 CL15 Q38

## PHOCAL C 15

15 % Chaux vive CL 90 selon EN 459-1 CL 90-Q (R5, P1)  
85 % Ciment puzzolanique HRB 32,5 / selon EN 13282 -1 - E4

Usine de D - 79268 Bötzingen

## COMPOSITION DECLAREE (en %)

### Constituants

Clinker (K)	47
Laitier de haut-fourneau (S)	--
Chaux (CL)	15
Sulfate de calcium (Cs)	--
Pouzzolanes naturelles (Q)	38
Cendres volantes siliceuses (V)	--
Cendres volantes calciques (W)	--
Calcaires (L ou LL)	--
Cendres volantes (Va ou Wa)	--
Constituants secondaires	--

### Activant de prise

Sulfate de calcium

## RESISTANCE A LA COMPRESSION (en MPa) des composants hydrauliques (\*), selon EN 196

7 jours: 30 MPa

28 jours: 47 MPa

## CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Selon EN 196

Sur poudre / Phocal C 15

Sur pâte pure (\*) / HRB 32,5 E

Masse volumique (en g/cm<sup>3</sup>): 2,96

Début de prise (en min): 180

## CARACTERISTIQUES CHIMIQUES (en %)

SiO<sub>2</sub> 30  
MgO 1,6

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 11,6  
SO<sub>3</sub> 1,4

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3  
CaO<sub>libre</sub> 14

CaO 44



HANS G. HAURI KG Mineralstoffwerke  
Bergstr. 114 / D - 79268 Bötzingen  
Tel: 0049 7663 9390-0  
Fax: 0049 7663 9390-93  
E-Mail: hauri@hauri.de

(\*) la résistance à la compression d'après la norme européenne EN 196 utilisée sur les composants hydrauliques K + Q sans chaux vive

# FICHE PRODUIT

LIANT ROUTIER HRB 32,5 E / K55 Q45

## ZIP 35

Ciment puzzolanique HRB 32,5 / selon EN 13282 -1 - E4

Usine de D - 79268 Bötzingen

## COMPOSITION DECLAREE (en %)

### Constituants

Clinker (K)	55
Laitier de haut-fourneau (S)	--
Chaux (CL)	--
Sulfate de calcium (Cs)	--
Pouzzolanes naturelles (Q)	45
Cendres volantes siliceuses (V)	--
Cendres volantes calciques (W)	--
Calcaires (L ou LL)	--
Cendres volantes (Va ou Wa)	--
Constituants secondaires	--

### Activant de prise

Sulfate de calcium

## RESISTANCE A LA COMPRESSION (en MPa) des composants hydrauliques (\*), selon EN 196

7 jours: 30 MPa

28 jours: 47 MPa

## CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Selon EN 196

### Sur poudre

Masse volumique (en g/cm<sup>3</sup>): 2,90

### Sur pâte pure (\*)

Début de prise (en min): 180

## CARACTERISTIQUES CHIMIQUES (en %)

### Sur poudre

SiO<sub>2</sub> 36  
MgO 1,5

### Sur pâte pure (\*)

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 14  
SO<sub>3</sub> 1,7

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3,7

CaO 35



HANS G. HAURI KG Mineralstoffwerke

Bergstr. 114 / D - 79268 Bötzingen

Tel: 0049 7663 9390-0

Fax: 0049 7663 9390-93

E-Mail: hauri@hauri.de

# FICHE PRODUIT

LIANT HYDRAULIQUE CEM II / B-Q 42,5 N / K75 Q25

Attestation de Conformité Européenne 0672-CPD - I 11.10.3

## PHONOS

Ciment puzzolanique EN 197 - CEM II / B-Q 42,5 N

Usine de D - 79268 Bötzingen

## COMPOSITION DECLAREE (en %)

### Constituants

### Activant de prise

Clinker (K)	75	Sulfate de calcium
Laitier de haut-fourneau (S)	--	
Chaux (CL)	--	
Sulfate de calcium (Cs)	--	
Pouzzolanes naturelles (Q)	25	
Cendres volantes siliceuses (V)	--	
Cendres volantes calciques (W)	--	
Calcaires (L ou LL)	--	
Cendres volantes (Va ou Wa)	--	
Constituants secondaires	--	

## RESISTANCE A LA COMPRESSION (en MPa)

selon EN 196

2 jours: 21 N/mm<sup>2</sup>

28 jours: 52 N/mm<sup>2</sup>

## CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Selon EN 196

### Sur poudre

### Sur pâte pure (\*)

Masse volumique (en g/cm<sup>3</sup>) : 2,98  
Refus à 90 µm (en %) : 0,10  
Refus à 63 µm (en %) : --  
Refus à 48 µm (en %) : --

Début de prise (en min) : ≥ 120

## CARACTERISTIQUES CHIMIQUES (en %)

SiO <sub>2</sub>	25	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3	CaO	53
MgO	2	SO <sub>3</sub>	2	CaO <sub>libre</sub>	2		



HANS G. HAURI KG Mineralstoffwerke  
Bergstr. 114 / D - 79268 Bötzingen  
Tel: 0049 7663 9390-0  
Fax: 0049 7663 9390-93  
E-Mail: info@hauri.de

## **ANNEXE III**

Implantation des sondages à la pelle sur le  
site de Geispolsheim RD401/RD84



# **ANNEXE IV**

Sondage F1 à sondage F18

Date : 20/05/2015

Prof. en m.	matériel	Nappe	COUPE		Description des sols	Echant.	Résultats d'essais ou observations
			Prof	NGF			
1					Terre végétale		
			0.40				
2					Limon marron à brun		
			1.30				
3	Tracto-Pelle				Loess brun		
			2.70				
3					Sable beige à gris		
			2.90				
4					Sable et graviers		
			3.00				

Observations : /

**Nappe: pas d'eau à la prof. reconnue  
( à la date du sondage)**

## SONDAGE F2

Chantier : Fouilles à la pelle RD 401/RD84  
 Client : DREAL  
 Dossier : EST.F.041

Annexe:




Date : 20/05/2015

Prof. en m.	matériel	Nappe	COUPE	Prof NGF	Description des sols	Echant.	Résultats d'essais ou observations
					Terre végétale		
1					Limons marron à brun		
2					Loess brun		
3	Tracto-Pelle				Loess sableux brun		
					Sable et graviers		
4							

Observations : /

**Nappe: pas d'eau à la prof. reconnue**  
 ( à la date du sondage)

Date : 20/05/2015

Prof. en m.	matériel	Nappe	COUPE	Prof NGF	Description des sols	Echant.	Résultats d'essais ou observations
				0.15	Remblai sablo-graveleux		
1					Limon marron à brun		
2				1.40	Loess brun		
3				2.90	Loess sableux brun		
				3.10	Sable beige à gris		
				3.50	Sable et graviers		
4	Tracto-Pelle			3.80			

Observations : /

**Nappe: pas d'eau à la prof. reconnue**  
( à la date du sondage)




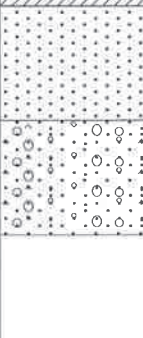
Date : 20/05/2015

Prof. en m.	matériel	Nappe	COUPE		Description des sols	Echant.	Résultats d'essais ou observations
			Prof	NGF			
1			0.50		Remblai sablo-gravelo limoneux marron		
			1.40		Limon marron à brun		
2			1.40		loess brun		
			3.00				
3			3.00		Sable gris beige légèrement loessique		
			3.50		Sable et graviers		
4	Tracto-Pelle		3.50				
			3.80				

Observations : /

**Nappe: pas d'eau à la prof. reconnue ( à la date du sondage)**

Date : 20/05/2015

Prof. en m.	matériel	Nappe	COUPE	Prof NGF	Description des sols	Echant.	Résultats d'essais ou observations
1				0.10	Remblai gravelo-limoneux		
				1.10	Limon marron à brun		
2					Loess brun		
3					Sable et graviers		
4	Tracto-Pelle			3.80			

Observations : /

Nappe: pas d'eau à la prof. reconnue  
( à la date du sondage)


Date : 20/05/2015

Prof. en m.	matériel	Nappe	COUPE		Description des sols	Echant.	Résultats d'essais ou observations
			Prof	NGF			
1			0.10		Remblai sablo-graveleux + terre végétale		
			1.30		Limons marron à brun		
2			3.00		Loess brun		
			3.20		Sable beige à gris		
3			3.20		Sable et graviers		
			3.50				
4							

Observations : /

**Nappe: pas d'eau à la prof. reconnue**  
( à la date du sondage)


Date : 20/05/2015

Prof. en m.	matériel	Nappe	COUPE	Prof NGF	Description des sols	Echant.	Résultats d'essais ou observations
				0.30	Remblai sablo-graveleux		
1				1.10	Limon marron à brun		
2					Loess brun		
3				3.50	Sable gris beige		
4	Tracto-Pelle			3.80	Sable et graviers		
				4.00			

Observations : /

**Nappe: pas d'eau à la prof. reconnue  
( à la date du sondage)**


Date : 20/05/2015

Prof. en m.	matériel	Nappe	COUPE	Prof NGF	Description des sols	Echant.	Résultats d'essais ou observations
				0.10	Terre végétale		
1				1.30	Limons marron à brun		
2				2.30	Loess brun		
				2.40	Sable beige à gris		
3	Tracto-Pelle			2.80	Sable et graviers		
4							

Observations : /

**Nappe: pas d'eau à la prof. reconnue**  
 ( à la date du sondage)

Date : 20/05/2015

Prof. en m.	matériel	Nappe	COUPE	Prof NGF	Description des sols	Echant.	Résultats d'essais ou observations
				0.10	Terre végétale		
1				1.00	Limon marron à brun		
2					Loess brun		
3				3.00	Sable brun		
				3.50	Sable et graviers		
4	Tracto-Pelle			3.70			

Observations : /

Nappe: pas d'eau à la prof. reconnue  
( à la date du sondage)


Date : 20/05/2015

Prof. en m.	matériel	Nappe	COUPE		Description des sols	Echant.	Résultats d'essais ou observations
			Prof	NGF			
1					Terre végétale		
			0.20				
2					Limon marron à brun		
			0.60				
3	Tracto-Pelle				Loess brun		
			2.70				
3					Loess sableux brun		
			2.80				
			2.90			Sable beige	
4					Sable et graviers		
			3.10				

Observations : /

**Nappe: pas d'eau à la prof. reconnue**  
( à la date du sondage)

Date : 20/05/2015






Prof. en m.	matériel	Nappe	COUPE	Prof NGF	Description des sols	Echant.	Résultats d'essais ou observations
				0.20	Terre végétale		
				0.50	Limon marron à brun		
1					Loess brun		
2				2.50	Sable beige à gris		
				2.80	Sable et graviers		
3	Tracto-Pelle			3.00			
4							

Observations : /

**Nappe: pas d'eau à la prof. reconnue  
( à la date du sondage)**




Date : 20/05/2015

Prof. en m.	matériel	Nappe	COUPE	Prof NGF	Description des sols	Echant.	Résultats d'essais ou observations
				0.20	Terre végétale		
					Limons marron à brun		
1				0.50			
					Loess brun		
2				2.40			
					Sable gris beige légèrement graveleux		
3	Tracto-Pelle			2.70			
					Sable et graviers		
4				2.80			

Observations : /

**Nappe: pas d'eau à la prof. reconnue**  
( à la date du sondage)







Date : 20/05/2015

Prof. en m.	matériel	Nappe	COUPE	Prof NGF	Description des sols	Echant.	Résultats d'essais ou observations
				0.10	Terre végétale		
				0.90	Limon marron à brun		
1							
					Loess brun		
2							
				2.70	Sable gris beige		
				2.90	Sable et graviers		
3	Tracto-Pelle			3.00			
4							

Observations : /

**Nappe: pas d'eau à la prof. reconnue (à la date du sondage)**




Date : 20/05/2015

Prof. en m.	matériel	Nappe	COUPE	Prof NGF	Description des sols	Echant.	Résultats d'essais ou observations
					Remblai sablo-graveleux		
				0.40			
1				1.40	Limons marron à brun		
2				2.70	Loess brun		
3	Tracto-Pelle			3.00	Loess sablo-graveleux brun		
				3.20	Sable et graviers		
4							

Observations : /

**Nappe: pas d'eau à la prof. reconnue**  
( à la date du sondage)


Date : 20/05/2015

Prof. en m.	matériel	Nappe	COUPE	Prof NGF	Description des sols	Echant.	Résultats d'essais ou observations
1				0.20	Terre végétale		
				1.10	Limon marron à brun		
2					Loess brun		
3	Tracto-Pelle			2.90			
				3.00	Sable gris beige		
				3.10	Sable et graviers		
4							

Observations : /

Nappe: pas d'eau à la prof. reconnue  
( à la date du sondage)





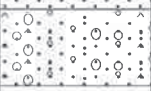
Date : 20/05/2015

Prof. en m.	matériel	Nappe	COUPE	Prof NGF	Description des sols	Echant.	Résultats d'essais ou observations
				0.20	Terre végétale		
1				1.20	Limon marron à brun		
2				2.90	Loess brun		
3	Tracto-Pelle			3.00	Sable gris beige		
				3.20	Sable et graviers		
4							

Observations : /

**Nappe: pas d'eau à la prof. reconnue ( à la date du sondage)**

Date : 20/05/2015

Prof. en m.	matériel	Nappe	COUPE	Prof	NGF	Description des sols	Echant.	Résultats d'essais ou observations
				0.30		Terre végétale		
1				1.20		Limon marron à brun		
2				2.70		Loess brun		
3	Tracto-Pelle			2.90		Sable gris beige		
				3.10		Sable et graviers		
4								

Observations : /

Nappe: pas d'eau à la prof. reconnue  
( à la date du sondage)

# **ANNEXE V**

Procès-verbaux d'essais

<b>Cerema</b> <i>Site de Strasbourg</i>	<b>PROCES VERBAL DE RESULTATS D'ESSAIS</b> <b>ESSAI PROCTOR NORMAL et INDICE PORTANT</b> <b>IMMEDIAT</b>	PV n° :	T15109
		Date :	11/9/15

Étude n° : C15ES0037

Chantier : Rocade Sud de Strasbourg

Demandeur : DREAL Alsace PMO

Adresse : 2 route d'Oberhausbergen BP 81005 67070 STRASBOURG CEDEX

Nature du matériau : LOESS

Classe GTR (NF P 11-300) : A1

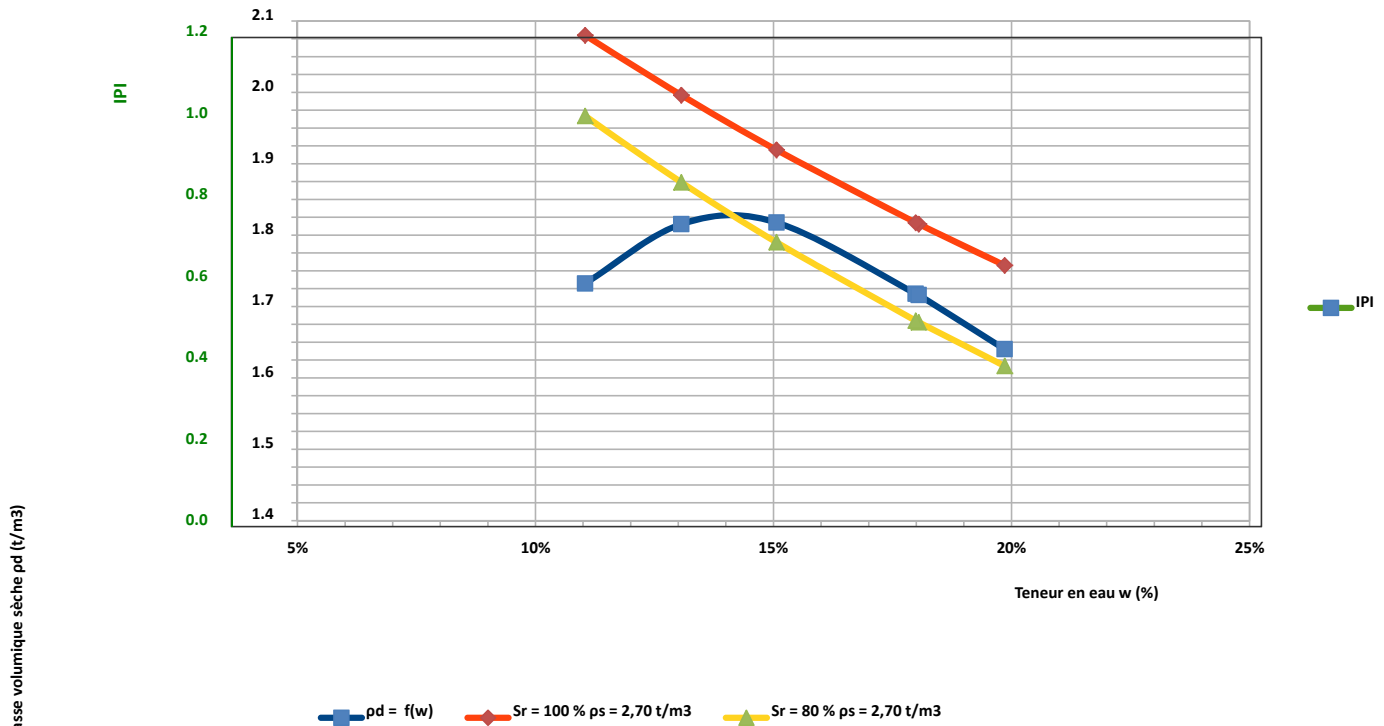
N° sondage :

Date du prélèvement : 20/05/2015

Profondeur :

Lieu de prélèvement : Déblai OA5

Destination :



### RESULTATS

Teneur en eau	11.0%	13.1%	15.1%	18.0%	18.1%	19.9%		
Masse volumique sèche	1.73	1.82	1.82	1.72	1.72	1.64		
IPI								
Teneur en eau optimum ( $W_{OPN}$ ) :					14.0%			
Masse volumique sèche optimum ( $\rho_{dOPN}$ ) :					1.83			

Autres essais : VBS = 1,47

Observations : Mélange T15042 / T15066 / T15074

Le responsable d'essais (RE) : Marc Jabiri

Cerema <i>Site de Strasbourg</i>	PROCES VERBAL DE RESULTATS D'ESSAIS ESSAI PROCTOR NORMAL et INDICE PORTANT IMMEDIAT	PV n° :	T15017
		Date :	11/9/15

Étude n° : C15ES0037

Chantier : Rocade Sud de Strasbourg

Demandeur : DREAL Alsace PMO

Adresse : 2 route d'Oberhausbergen BP 81005 67070 STRASBOURG CEDEX

Nature du matériau : LOESS

Classe GTR (NF P 11-300) : A1

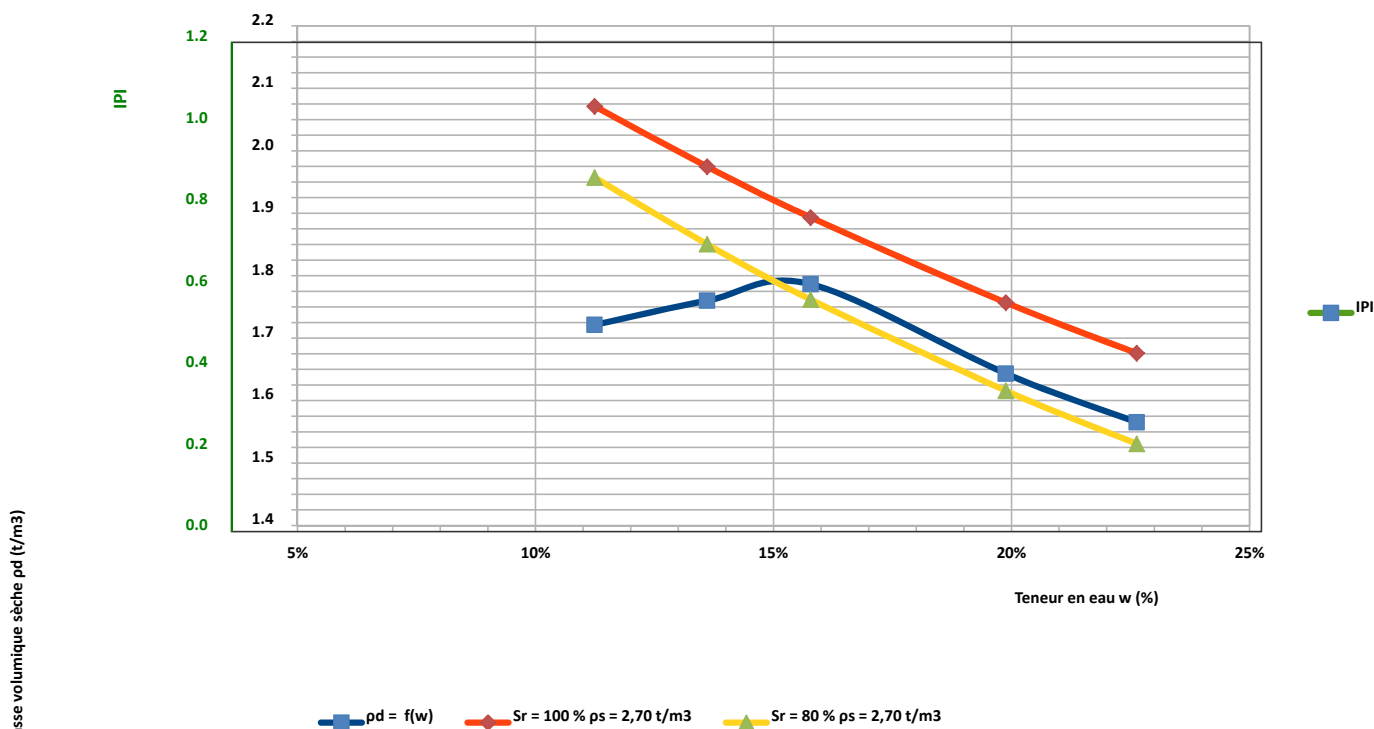
N° sondage :

Date du prélèvement : 20/05/2015

Profondeur :

Lieu de prélèvement : Déblai OA5

Destination :



## RESULTATS

Teneur en eau	11.2%	13.6%	15.8%	19.9%	22.6%			
Masse volumique sèche	1.72	1.76	1.79	1.64	1.57			
IPI								
Teneur en eau optimum ( $W_{OPN}$ ) :					15.0%			
Masse volumique sèche optimum ( $\rho_{dOPN}$ ) :					1.79			

Autres essais : VBS = 2,02

Observations : Mélange T15072 / T15048 / T15048 / T15035

Le responsable d'essais (RE) : Marc Jabiri