

# Caractérisation, mise en œuvre et contrôle du compactage des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) dans le domaine des terrassements

Alain QUIBEL  
Eric EVAIN\*

Centre d'Études Techniques de l'Équipement  
Normandie-Centre, CER Rouen,  
Grand Quevilly, France

## ■ RÉSUMÉ

Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) sont des sous-produits industriels de classe F6. Leurs conditions de mise en œuvre ne sont pas définies dans le guide technique « Réalisation des remblais et des couches de forme ». De même les conditions de contrôles de compactage ne sont pas déterminées. Dans le cadre du programme de recherche du Laboratoire central des Ponts et Chaussées concernant l'impact des infrastructures sur l'environnement, le Centre d'expérimentation routière de Rouen a mené des expérimentations sur l'emploi des MIOM pour répondre à ces questions. La démarche est complémentaire à celle menée en Île-de-France qui a permis la rédaction d'un guide technique régional. Trois natures de MIOM différents ont été testées. Les résultats aboutissent à proposer des tableaux de compactage pour les remblais et les couches de formes relatives au matériau F61, incluant une définition plus serrée des bornes d'état hydrique que celles du guide Île-de-France, et établissent les règles d'interprétation pour le contrôle de compactage par un pénétromètre dynamique PDG1000. L'emploi du mâchefer suppose par ailleurs que les réglementations au plan environnemental soient respectées ces dernières ne font pas partie du champ de la présente étude.

## Characterization, implementation and control of municipal solid waste incineration (MSWI) compaction in the field of earthworks

### ■ ABSTRACT

Municipal solid waste incineration (MSWI) is an industrial byproduct of the "F6" category. The conditions relative to its implementation have not been defined in the technical guide entitled "Embankment and subgrade construction" (GTR); moreover, compaction control conditions have not been determined either. As part of LCPC's research program devoted to determining the impacts of infrastructure on the environment, the Rouen-based Road Research Laboratory has conducted a number of experiments on the use of MSWI in order to develop a response to such concerns. The approach employed is complementary to that undertaken in the Paris Region and has provided the basis for producing a regional technical guide. Three distinct types of MSWI were tested during this campaign. The results obtained lead to proposing compaction tables for both embankments and capping layers relative to the "F61" material, including a more precise definition of moisture limits than that contained in the Paris Regional guide. In addition, these results serve to establish a set of interpretation rules for compaction control by means of a PDG 1000 dynamic penetrometer. The use of clinker presumes that environmental regulations are being respected and, for this reason, such regulations have not been included within the scope of the present study.

\* AUTEUR À CONTACTER :

Eric EVAIN\*

eric.evain@developpement-durable.gouv.fr

## OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Les objectifs détaillés de cette opération, définis conjointement avec le LCPC, sont :

- d'examiner les essais de caractérisation géotechnique de la classe F61 de la norme NF P 11-300 [1] ;
- de proposer une définition des sous-classes F61 au regard des états hydriques ;
- de déterminer des tableaux de compactage adaptés pour la mise en œuvre des couches de remblai et de couche de forme ;
- de définir le contrôle de compactage à l'aide du pénétromètre dynamique PDG100 des matériaux F61 en caractérisant la position des droites limites et de références ( $d_L$ ,  $d_R$ ) pour la fonction B de la norme XP P 94-063 [2]. Les pénétromètres rentrant dans le cadre de la norme XP 94-105 [3] n'ont pas fait l'objet d'essais car ils n'étaient pas inclus dans le cahier des charges initial.

## CARACTÉRISATION GÉOTECHNIQUE DU MÂCHEFER

La caractérisation est faite dans le cadre des essais nécessaires à l'application de la norme NF P 11-300, et évite l'utilisation des essais non conventionnels ou difficilement diffusables, tout en suivant le cadre de la sous-classe F61 telle que définie dans le guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux Île-de-France « Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères » [4] (tableau 1).

Le programme d'essais de caractérisation du mâchefer s'est notamment attaché à étudier les points suivants :

- réalisation d'essais géotechniques standards ;
- méthodologie de mesure de la teneur en eau du mâchefer ;
- obtention d'une densité de référence ;
- caractérisation de l'évolutivité du matériau.

Tout en s'inscrivant dans le domaine terrassements (remblais et couche de forme), ce chapitre contient des éléments de caractérisation (essais OPM et VCPC) plus larges, qui intéressent le domaine chaussées. Les expérimentations des chapitres suivants ne portent par contre que sur le premier domaine, conformément aux objectifs cités en début d'article.

**tableau 1**  
Classification de la  
classe F6 selon le guide  
technique pour l'utilisation  
des matériaux régionaux  
Île-de-France.

Famille selon la norme NF P 11-300	Classement selon le GTR	Caractérisation selon		Classement selon la circulaire du 9 mai 1994	Sous- classe	Description
		La nature	L'état hydrique			
F6  Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères	F61	$D_{\max} < 50 \text{ mm}$	$IPI < 10^{**}$ ( $W > 1,3 W_{OPN}$ )	Catégorie V ou rendu V après maturation dans le cas de classe- ment initial M	$F_{61th}$	Il s'agit de mâchefers : – bien incinérés – criblés – déferpillés – valorisables au sens de la circulaire du 9 mai 1994 – stockés plusieurs mois avec une limitation à un an
			$1,2 W_{OPN} \leq W < 1,3 W_{OPN}$ ( $10 \leq IPI \leq 20$ )		$F_{61h}$	
		Passant à 2 mm < 50 %	$0,8 W_{OPN} \leq W < 1,2 W_{OPN}$ ( $IPI > 20$ )		$F_{61m}$	
			$0,6 W_{OPN} \leq W < 0,8 W_{OPN}$		$F_{61s}$	
		Passant à 0,08 mm ≤ 12 %	$W < 0,6 W_{OPN}$		$F_{61ts}$	
	F62	VBS < 0,2 ES > 30  LA ≤ 45* MDE ≤ 45*	$IPI < 10$ ( $W > 1,3 W_{OPN}$ )		$F_{61th}$	Même description que $F_{61}$ , mais de fraîche production (pour mémoire)

\* les seuils fixés ne concernent que les MIOM utilisés en couche de forme non traitée.

\*\* Pour définir l'état hydrique, les paramètres inscrits en gras sont ceux dont le choix est à privilégier.

## ■ Essais en laboratoire

Dans la première campagne d'essais, le CER a utilisé des MIOM provenant de l'usine Vesta (valorisation énergétique, site de tri de l'arrondissement de Rouen) ayant pour maître d'ouvrage le Syndicat mixte d'élimination des déchets de l'arrondissement de Rouen (Smedar).

L'identification géotechnique comporte les essais suivants :

- Courbe granulométrique (norme NF P 94-056) [5]
- Essai Proctor normal (norme NF P 94-093) [6]
- Essai Los Angeles (norme NF P 18-573) [7]
- Essai Micro-Deval (norme NF P 18-572) [8]
- Essai de fragmentabilité (norme NF P 94-066) [9]
- Essai de dégradabilité (norme NF P 94-067) [10]

L'absence de mesure d'argilosité par la valeur de bleu de méthylène (VBS) selon la norme NF P 94-068 [11] est due à ce que l'essai n'est pas adapté au mâchefer, car les propriétés amphotères du bleu de méthylène ne sont pas applicables. Nous attirons l'attention sur le fait que certaines identifications sont faites sur la foi d'une valeur de VBS, normalement très faible sur le mâchefer, et concluent alors abusivement à l'assimilation du mâchefer à un sol insensible à l'eau de classe D.

Par ailleurs, les courbes d'indice portant immédiat (IPI, norme NF P 94-078 [12]) n'ont pas été intégrées dans les essais à ce stade, mais des courbes IPI ont été réalisées ultérieurement sur les matériaux des planches d'essais. Elles figurent au chapitre relatif à la détermination des sous-classes d'état hydrique.

Les résultats obtenus (tableau 2) montrent que le matériau est peu dégradable ( $DG < 5$ ). Le GTR assimile le mâchefer à un matériau rocheux tendre R43 ( $FR > 7$ ). Si la valeur de fragmentabilité obtenue (2,95) est bien inférieure à 7, la valeur de Los Angeles est très proche de la limite de 45 qui laisse à penser que le matériau est potentiellement fragmentable donc potentiellement évolutif.

**tableau 2**  
Résultats obtenus en  
laboratoire au CER.

Granulométrie													Essai Proctor		LA	MD*	DG	FR
Tamis (mm)	0,08	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20	31,5	50	100	$W_{opn}$ (%)	$\rho_{dOPN}$				
Passant (%)	10	10,6	13,3	18,4	23,9	32,6	52,5	77,9	96,5	99,6	100	100	19,7	1,58	43	26	1,38	2,95

\* sur fraction 6,3/10 mm

## ■ Teneur en eau

### ➤ Influence de la température de l'étuve

La question posée est celle de la proportion d'eau liée dans le mâchefer par rapport à l'eau libre. Cette eau liée peut-elle se libérer lors du compactage ? La quantification de cette proportion d'eau liée est faite par des mesures à différentes températures d'étuves.

Dans un premier temps les mesures de teneur en eau sont faites à 50 °C, pour quantifier l'eau circulant librement, et à 105 °C pour quantifier l'eau liée au mâchefer du fait de sa porosité et/ou de sa nature physico-chimique. Des mesures sont faites à 150 °C pour voir si cela génère un changement dans la valeur finale (tableau 3).

De plus, des mesures de teneur en eau à une température de 35 °C sont effectuées sur un temps de séchage long afin de vérifier que toute l'eau libre est éliminée (tableau 4).

Les essais montrent qu'il est inutile de faire des mesures à 50, 105 ou 150 °C à 5 jours puisque la teneur en eau ne varie plus au bout de 3 jours. Par ailleurs les mesures à 150 °C sont identiques à celles effectuées à 105 °C, ce qui indique que cette dernière température est suffisante pour indiquer la totalité de l'eau (libre et liée) contenue dans le matériau. Les mesures de teneur en eau effectuées lors des expérimentations des chapitres suivants sont toutes effectuées à 105 °C.

**tableau 3**  
Évolution de la mesure de teneur en eau en fonction de la température.

Température de l'étuve (°C)	Temps de séchage (jours)	Teneur en eau (%)					Moyenne (%)	Ecart-type	D ( $W_{5j}-W_{3j}$ )
		W1	W2	W3	W4	W5			
50	3	15,4	14,8	13,7	15,1	15,2	14,8	0,67	0,02
	5	15,4	14,8	13,8	15,1	15,2	14,9	0,63	
105	3	17	16,7	18	17,4	17,4	17,3	0,49	0,00
	5	17	16,7	18	17,4	17,4	17,3	0,49	
150	3	18,1	18,5	16,4	18,6	14,4	17,2	1,80	0,08
	5	18,2	18,5	16,5	18,7	14,5	17,3	1,78	

**tableau 4**  
Évolution en fonction du temps de séchage.

Température de l'étuve en °C et temps de séchage (j)	Teneur en eau (%)										Moyenne en %	Ecart-type
	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8	W9	W10		
35 °C (7 j)	10,3	11,1	9,5	9,3	11,8	11,3	10,1	11,4	10,3	8,9	10,4	0,98
35 °C (9 j)	11,3	11,5	11,2	10,6	12	12	10,5	12,1	11,5	10,2	11,3	0,67
35 °C (14 j)	11,4	11,6	11,9	10,9	12,1	12,2	10,6	12,4	11,8	10,6	11,6	0,66
35 °C (28 j)	11,8	12	12,3	11,3	12,5	13,1	10,9	12,7	12,1	10,9	12,0	0,74

#### ➤ Influence de la granulométrie

L'objectif est d'observer si la teneur en eau dépend essentiellement de la proportion fine du matériau (inférieure à 80 µm).

Des mesures de teneurs en eau sont effectuées dans la fraction 0/10 mm du matériau et sont comparées à celles obtenues dans la fraction naturelle (**tableau 5**). Les mesures ayant été faites en même temps que celles de l'influence de la température, cela explique des mesures aux températures de 50, 105 et 150 °C.

Une proportion d'eau plus importante est contenue dans la partie fine du matériau, mais les valeurs sur le 10/40 sont différentes de celles obtenues sur un matériau granulaire classique, habituellement très basses. Un examen visuel du refus granulométrique à 20 mm, et en moindre partie à 10 mm, montre qu'il s'agit en majorité d'éléments en verre ou d'éléments graveleux légèrement poreux mais non « argileux ».

**tableau 5**  
Évolution de la teneur en eau en fonction du temps de séchage.

Granulométrie (mm)	Temp. de l'étuve (°C)	Passant (%)	$W_{0/d}$ moyenne mesurée (%)	Proportion d'eau totale	Proportion d'eau totale	Wd/40
				dans la fraction 0/d (%)	dans la fraction d/40 (%)	
Naturelle 0/40	50 (5 jours)		14,8			
	100 (5 jours)	100	17,3			
	150 (5 jours)		17,2			
0/10	50 (5 jours)		16,6	87,4	12,6	8,5
	100 (5 jours)	77,9	18,8	84,7	15,3	12,0
	150 (5 jours)		18	81,5	18,5	14,4

#### ➤ Influence du compactage

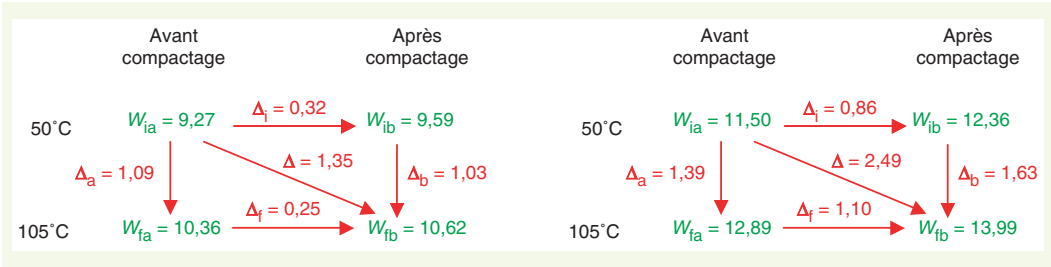
Compte tenu de la fragmentabilité potentielle du mâchefer, il est important de savoir si son évolution au cours du compactage influe sur la mesure de teneur en eau. Lors du compactage de l'eau liée au sein des particules de mâchefer pourrait être libérée par l'attrition des grains.

En considérant que la masse d'eau totale (libre + liée) présente dans le mâchefer est constante au cours de l'essai (qui dure quelques heures), on doit avoir :

$$\Delta_f \approx 0 \text{ (conservation massique) et } \Delta = \Delta_i + \Delta_b = \Delta_f + \Delta_a$$

- avec  $\Delta$  : potentiel total d'eau liée
- $\Delta_i$  : variation de l'eau libre due au compactage
- $\Delta_f$  : variation de l'eau totale (libre + liée) due au compactage
- $\Delta_a$  : potentiel d'eau liée avant compactage
- $\Delta_b$  : potentiel d'eau liée après compactage

**figure 1**  
Compactage à l'énergie Proctor normal et compactage à l'énergie Proctor modifiée.



A l'énergie Proctor normal, ce résultat indique que les teneurs en eau avant et après compactage ne sont pas significativement différentes (test de Student). A l'énergie Proctor modifiée, on a  $\Delta_f = 1,10$ , alors qu'il devrait être quasiment nul. Ce résultat semble indiquer que de l'eau qui devait être emprisonnée à l'intérieur des grains de mâchefer a été libérée sous l'action du compactage.

### ➤ Conclusions sur la teneur en eau

- Les essais montrent qu'une température de 105 °C est nécessaire et suffisante pour mesurer la teneur en eau totale.
- Une mesure à la teneur en eau avec une méthode identique à celle pratiquée pour les matériaux conventionnels (étuve à 105 °C) est convenable.
- La proportion d'eau la plus importante est contenue dans la fraction fine du matériau. Le compactage à l'énergie Proctor normal ne libère pas d'eau lors du compactage et ne change pas l'état hydrique du matériau ; le compactage à énergie beaucoup plus élevée (Proctor modifié) peut en libérer de façon très limitée, de l'ordre de 1 %.

## ■ Densité de référence

### ➤ Essai Proctor normal

Les mesures effectuées à différentes époques sur différentes productions de la même usine montrent que la densité  $\rho_{dOPN}$  varie en relatif de 6 % (1,54 à 1,64) alors que la teneur en eau  $W_{OPN}$  varie de 27 % (15,4 à 21,1 %). Cette variation sur les caractéristiques Proctor a également été notée sur un même stock de matériau puisque sur 4 essais OPN effectués on obtient une dispersion de la teneur en eau comprise entre 18,7 et 21 % et la masse volumique sèche varie quant à elle entre 1,53 et 1,63 t·m<sup>-3</sup>. Il existe en outre une influence de la préparation des échantillons sur les résultats de l'essai, notamment au regard de la durée d'imbibition. Avec l'avis du LRPC de Rouen, une durée d'imbibition de 1 h 30 pour les échantillons de mâchefer est retenue.

Des courbes granulométriques ont été effectuées avant et après un essai Proctor normal afin de quantifier la production de fines créée par l'essai (tableau 6).

Un essai Proctor normal unique (voir l'effet des répétitions au chapitre Évolutivité du matériau) génère une évolution granulométrique limitée sur le mâchefer. Le constat visuel de l'effet du com-

**tableau 6**  
Évolution  
granulométrique du  
matériau lors d'un essai  
Proctor normal.

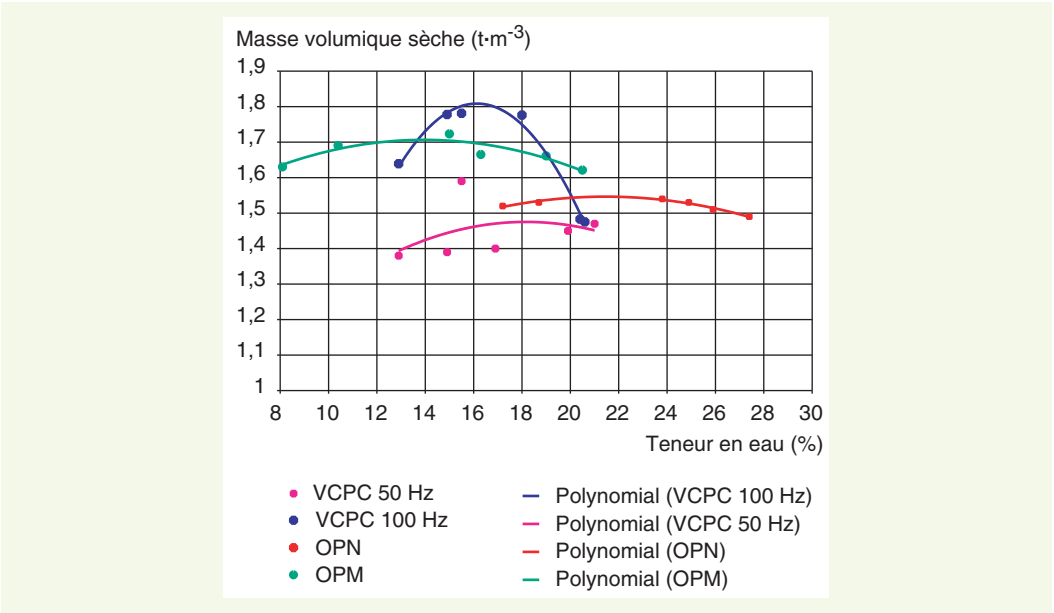
Tamis (mm)	0,08	0,1	0,2	0,5	1	2	5	10	20
Passant avant essai (%)	10,1	10,8	13,5	18,7	24,3	33,2	53,4	78,2	96,8
Passant après essai (%)	12	12,7	15,6	21,7	28,5	38,4	59,9	83,9	100
Variation	1,9	1,9	2,1	3	4,2	5,2	6,5	5,7	3,2

packtage OPN sur le mâchefer montre qu’il s’agit essentiellement de morceaux de verre (majoritairement dans la fraction 10/20) qui se cassent. Les fines produites sont donc insensibles à l’eau.

› **Essai par vibro-compression à paramètres contrôlés (VCPC)**

L’idée est de remplacer l’essai Proctor, plutôt agressif sur le mâchefer qui est assez friable, par un essai VCPC susceptible a priori de générer moins d’évolution granulométrique. Les essais VCPC sont réalisés conformément à la norme NF P 98-231-3 [13], à 50 et 100 Hz, et à différentes teneurs en eau (figure 2).

**figure 2**  
Essai VCPC.



Les résultats obtenus au CER [14] montrent que :

- la densité maximale à la VCPC (1,78) est de 104 % de  $\rho_{dOPN}$  (1,72) ;
- la difficulté de compactage passe de DC3 (forte avec IDC  $\approx$  20 supérieur au seuil de 11 pour la classe DC3) pour des teneurs en eau plus faibles que 18 % à DC2 (moyenne) pour des teneurs en eau plus élevées. Le mâchefer est donc, à teneur en eau naturelle, très difficile à compacter.

› **Conclusions sur la densité de référence**

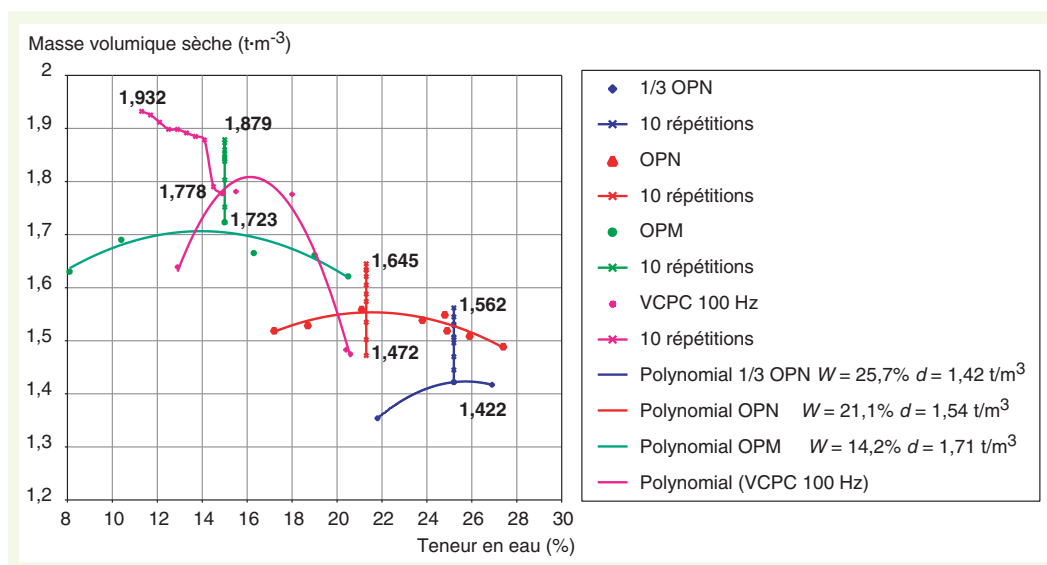
L’essai VCPC ne fournit pas d’apport significatif par rapport à l’essai Proctor dans la détermination d’une densité de référence constante. L’essai Proctor normal, ou modifié, peut donc être utilisé comme essai de détermination d’une densité de référence pour le mâchefer, respectivement pour l’emploi en terrassements et en couche de chaussées (après traitement éventuel).

■ **Évolutivité du matériau**

› **Essais**

Dans un premier temps, trois courbes d’énergies de compactage différentes sont effectuées sur le même stock de MIOM que celui ayant servi aux essais de laboratoire : une courbe à l’énergie Proctor normal, une courbe à l’énergie Proctor modifiée et une courbe à 1/3 de l’énergie Proctor normal.

**figure 3**  
Évolution de la densité  
à différentes énergies de  
compactage.



Puis, pour chaque courbe, au niveau du point optimum, 10 essais à la même énergie et avec le même échantillon remis à chaque fois dans le moule sont répétés pour observer l'évolution de la densité sèche du matériau (**figure 3**).

L'examen des courbes Proctor à diverses énergies montre un comportement classique du matériau vis-à-vis du compactage ; c'est-à-dire qu'une augmentation de l'énergie de compactage induit une augmentation des valeurs de masse volumique et une baisse des teneurs en eau à l'optimum.

La répétition sur 10 essais montre la forte évolution des densités à l'optimum quelles que soient les énergies de compactage. En examinant l'évolution de la masse volumique sèche au cours des 10 essais successifs, on ne constate pas de comportement asymptotique au 10<sup>e</sup> essai bien que la variation entre le 9<sup>e</sup> et le 10<sup>e</sup> essai soit inférieure à celle mesurée entre le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>e</sup> essai. Le matériau est donc évolutif au sens de ce protocole de caractérisation, malgré des valeurs de FR faibles (cf. **tableau 2**).

**tableau 7**  
Variation de la densité  
sèche sur un même  
échantillon à W constante.

Energie	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	D(10-1)	D(%)
1/3 OPN	1,422	1,445	1,47	1,496	1,507	1,506	1,531	1,529	1,545	1,562	<b>0,14</b>	<b>9,0</b>
OPN	1,472	1,502	1,535	1,574	1,588	1,605	1,621	1,634	1,633	1,645	<b>0,173</b>	<b>10,5</b>
OPM	1,723	1,752	1,803	1,879	1,838	1,842	1,86	1,852	1,845	1,873	<b>0,15</b>	<b>8,0</b>
VCPC	1,778	1,790	1,878	1,885	1,892	1,898	1,898	1,912	1,925	1,932	<b>0,15</b>	<b>8,0</b>

Les courbes granulométriques avant test et après le dixième essai permettent de représenter la production de fines en fonction de l'énergie de compactage. On observe une évolution granulométrique très sensible (le passant à 5 mm s'accroît d'un tiers et celui à moins de 2 mm d'au moins 50 % sous 10 compactages à l'énergie Proctor modifié). Il semble que l'évolution granulométrique est d'autant plus élevée que l'énergie est forte, mais cette interprétation est à confirmer du fait que l'essai à l'énergie Proctor normal est réalisé avec un échantillon de matériau nettement plus riche en fines que ceux aux autres énergies.

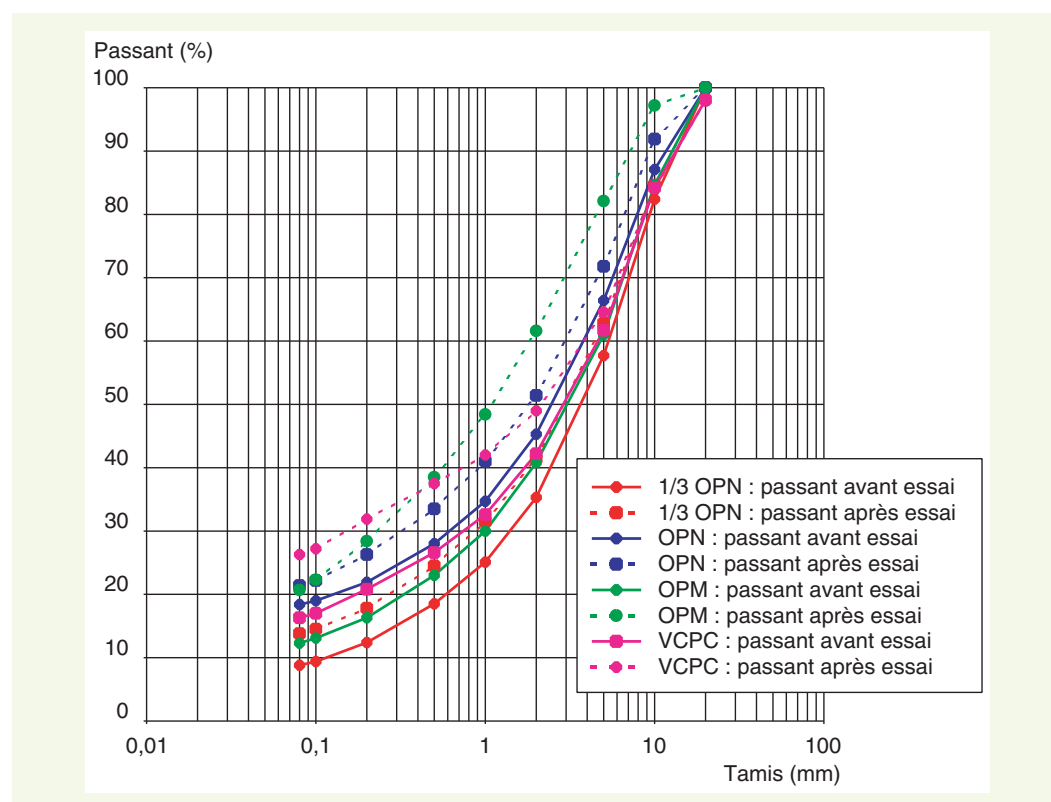
L'essai VCPC fait évoluer la densité maximale pratiquement autant que l'essai Proctor modifié par les 10 essais successifs (**tableau 8**). L'évolution granulométrique (**figure 4**) est forte également avec la VCPC (+ 10 % de fines après 10 essais), mais elle ne semble pas toucher l'ensemble de la courbe granulométrique de la même manière (davantage de fragmentation dès le 10 mm avec l'essai Proctor, surtout modifié, et davantage de production de fines avec la VCPC).



**tableau 8**  
Évolution de la  
granulométrie sous les 10  
compactages successifs.

Energie	Tamis (mm)	0.08	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	20
<b>1/3 OPN</b>	Passant avant essai (%)	8,8	9,4	12,4	18,5	25,1	35,3	57,7	82,4	100
	Passant après essai (%)	13,8	14,5	17,8	24,5	31,5	41,4	62,8	84,6	100
	différence	5	5,1	5,4	6	6,4	6,1	5,1	2,2	0
<b>OPN</b>	Passant avant essai (%)	18,4	19	21,9	28	34,7	45,3	66,4	87,1	100
	Passant après essai (%)	21,4	22,2	26,3	33,5	41	51,4	71,8	91,9	100
	différence	3	3,2	4,4	5,5	6,3	6,1	5,4	4,8	0
<b>OPM</b>	Passant avant essai (%)	12,3	13,1	16,3	23	30	40,8	61	84,7	100
	Passant après essai (%)	20,7	22,3	28,4	38,5	48,4	61,6	82,1	97,2	100
	différence	8,4	9,2	12,1	15,5	18,4	20,8	21,1	12,5	0
<b>VCPC</b>	Passant avant essai (%)	16,3	17	20,8	26,6	32,6	42,2	61,7	84,2	98,1
	Passant après essai (%)	26,3	27,2	31,9	37,5	42	49	64,6	84,2	97,9
	différence	10	10,2	11,1	10,9	9,34	6,8	2,9	0	-0,2

**figure 4**  
Évolution de la  
granulométrie.



### ➤ Conclusions sur l'évolutivité du matériau

L'essai Proctor à différentes énergies de compactage montre une forte évolutivité du matériau sous l'action mécanique du compactage (entre 8 et 10 % de variation de la densité sèche à l'optimum). Cette évolutivité s'accompagne d'une évolution granulométrique sensible (augmentation de 50 % du passant à 2 mm et de 33 % du passant à 5 mm). Un essai VCPC n'agissant pas par chocs produit néanmoins une évolution du même ordre de grandeur, l'attrition semblant alors plus présente que la fragmentation.

Acceptable en terrassements, cette évolutivité peut être un frein à l'utilisation du mâchefer non traité en structures de chaussées, dans les cas autres que pour des trafics faibles.



## ETABLISSEMENT DES CONDITIONS POUR LA MISE EN ŒUVRE ET LE COMPACTAGE DU MÂCHEFER

Le plan d'expérience vise à définir les épaisseurs de couche et les nombres de passes des diverses classes de compacteurs, pour la réalisation des remblais et des couches de forme en mâchefer. On cherche en particulier dans les expérimentations à :

- évaluer les caractéristiques mécaniques obtenues (essais de portance) ;
- mesurer les masses volumiques en place après compactage.

Les tableaux de compactage du mâchefer, établis pour les objectifs de densification  $q_4$  et  $q_3$  (utilisation en remblai et en couche de forme) ont la même signification que ceux définis pour les autres matériaux dans le guide technique « Réalisation des remblais et des couches de forme » [15] (GTR).

### ■ Plan d'expérience

Les principaux paramètres testés sur les planches d'essais au CER sont :

- la teneur en eau du matériau ;
- l'énergie de compactage (nombre de passes de compacteur) ;
- l'épaisseur de la couche compactée.

Les mesures des densités sèches en place, réalisées à l'aide de diagraphies à la double sonde gamma, permettent d'établir les conditions de compactages étendues aux divers cas de compacteurs en utilisant le modèle de compactage du CER [16]. Il suffit d'utiliser un compacteur donné. Une fois le calage réalisé pour les divers états hydriques des mâchefers, le modèle réalise toutes les simulations utiles à la production du [tableau 12](#).

Trois natures de mâchefers ont été testées ([tableau 9](#)) :

- SMEDAR provenant de l'usine d'incinération de Grand-Quevilly [17] ;
- YPREMA provenant d'Ivry-sur-Seine (nommé YPREMA 1) [18] ;
- YPREMA provenant de Saint-Thibaut (nommé YPREMA 2) [19].

Le compactage des planches est réalisé avec le compacteur du CER, classé VT2 ( $M_1/L = 28 \text{ kg/cm}$ ,  $A_0 = 0,8 \text{ mm}$ ) au sens de la norme NF P 98-736 [20].

**figure 5**  
*Vue d'une modalité mise en œuvre.*



**tableau 9**  
Modalités du plan  
d'expérience.

SMEDAR			YPREMA 1			YPREMA 2			Energie de compactage (nombre d'applications de charges)			
N° Modalité	État hydrique du matériau	Épaisseur de couche après compactage (m)	N° Modalité	État hydrique du matériau	Épaisseur de couche après compactage (m)	N° Modalité	État hydrique du matériau	Épaisseur de couche après compactage (m)				
1	état « m »	0,55	6	état « s »	0,30	10	état « m »	0,40	2	4	8	16
2	état « m »	0,30	7	état « s »	0,35	11	état « m »	0,40	2	4	8	16
3	état « s »	0,30	8	état « m »	0,55				2	4	8	16
4	état « h »	0,25	9	état « h »	0,75				2	4	8	16*
5	état « h »	0,25							2	4	8	

16\* : pour YPREMA 1 seulement

**■ Mesures réalisées**

Les références Proctor normal moyennes retenues sont indiquées dans le **tableau 10**.

**tableau 10**  
Références Proctor.

	SMEDAR	YPREMA 1	YPREMA 2
$\rho_{d_{OPN}}$ (t/m <sup>3</sup> )	1,57	1,61	1,61
$W_{OPN}$ (%)	19,5	18,3	19,9

**➤ Mesures de portance**

Les modules EV2 ont été mesurés sur chacune des planches d'essais par l'essai de plaque statique EV1/EV2 selon la norme NFP 94-117-1 [21] ; 4 à 6 points de mesures ont été faits pour chacune des modalités.

Les valeurs des modules sont faibles pour le mâchefer SMEDAR et moyennes pour les matériaux YPREMA. A l'état humide du mâchefer SMEDAR, les valeurs sont trop faibles pour être mesurables (< 20 MPa). Néanmoins après 6 mois de conservation à l'abri on constate une augmentation nette des valeurs de modules, dues à l'assèchement du matériau (passage de  $W_{nat} = 23,8\%$  à  $W_{nat} = 18,8\%$ ) et à un effet de pseudo-prise du mâchefer. Des observations extérieures montrent que les valeurs de portance acquises par cet effet ne sont pas stables dans le temps.

Pour la modalité 9, le caractère drainant du mâchefer n'a pas permis de mesurer des modules EV2 sur un matériau à l'état hydrique humide. Nous avons donc pris le parti de laisser 6 mois de délai après la mise en œuvre afin de constater un éventuel phénomène de prise ou de consolidation.

**tableau 11**  
Modules EV2 (MPa).

SMEAR					YPREMA 1					YPREMA 2				
Modalité	Nb passe	état	moyenne	écart type	Modalité	Nb passe	état	moyenne	écart type	Modalité	Nb passe	état	moyenne	écart type
2	$n = 4$	m	26,7	1,21										
2	$n = 16$	m	34,3	0,82	7	$n = 16$	s	54,9	2,71	11	$n = 16$	m	67,6	8,15
3	$n = 2$	s	29,7	3,01										
3	$n = 16$	s	35,5	0,55										
3	$n = 16$	s	44,4	2,30	8	$n = 16$	m	61,0	3,79					
5	$n = 2$	h	< 20	-										
5	$n = 8$	h	< 20	-	9	$n = 16$	m**	70,22	10,44					
5	$n = 8$	h	31,3*	5,24	9	$n = 16$	m/h***	59,8	7,05					

\* après 6 mois

\*\* après 6 mois – état moyen

\*\*\* après 6 mois – arrosage – état humide

Les valeurs mesurées après ce délai, annotée (2) dans le **tableau 11**, pour un même état hydrique moyen ( $W_{nat} = 17,4 \%$  en janvier 2004 et  $16,4 \%$  en juillet 2004), sont légèrement supérieures à celles de la mise en œuvre (passage de 61 à 70 MPa) mais ne semblent pas traduire un effet de prise du matériau. Puis le mâchefer a été de nouveau humidifié. Mais les teneurs en eau obtenues à l'issue des essais de plaque ( $18,9 \%$ ), malgré un arrosage conséquent, n'ont pas permis de conserver un état hydrique humide pour la durée des essais. En conclusion, sur les modules, on note un comportement particulier du mâchefer : son élasticité, voire une certaine capacité à absorber l'énergie, couplée à sa porosité, lui conférerait un comportement apparemment plus stable, par rapport à un sol courant, en dépit de valeurs d'essais faibles. Ceci reste à confirmer en chantier.

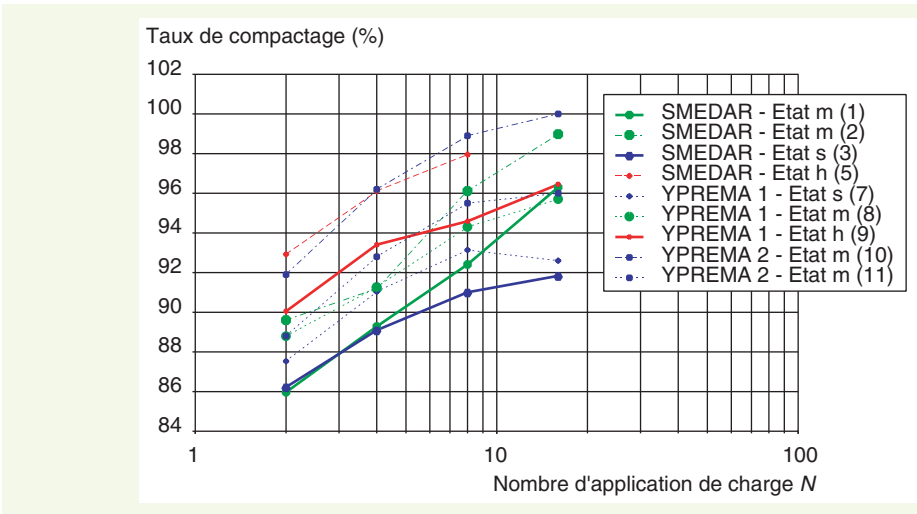
➤ **Mesures de densités moyennes au GPV**

Les résultats des mesures au GPV (**figure 7**) sont présentés **figure 6** en taux de compactage : rapport entre la densité sèche et la densité optimum Proctor normal du matériau.

$$T(\%) = \frac{\rho_d}{\rho_{dOPN}}$$

La densité obtenue concerne les 40 cm supérieurs des couches. Les résultats ne sont à interpréter qu'en les reliant avec les résultats des **figures 8 à 12** des taux de compactage en fonction de la profondeur pour les couches épaisses. On note, à épaisseur de couche équivalente, qu'un sol-support rigide (modalité 6) conduit à des densités plus fortes par effet d'enclume, que si la couche repose sur une autre couche de mâchefer (modalité 7).

**figure 6**  
Évolution du taux de compactage en fonction du nombre d'application de charge *N*.



**figure 7**  
Mesure au gammadensimètre à profondeur variable (GPV).



## ► Mesures de densité en fonction de la profondeur

L'essai consiste à mesurer l'évolution de la densité en place en fonction de la profondeur au moyen de la double sonde gamma GDS200 (**figure 13**) selon la norme NF P 94-062 [22]. Les résultats des **figures 8 à 12** mettent en évidence les gradients de densité du matériau à l'état de compactage final et les intercouches. En particulier, les insuffisances de densité dans la partie inférieure des couches trop épaisses apparaissent clairement, et constituent l'information nécessaire, en complément des résultats de densité moyenne de la **figure 6**, pour établir les tableaux de compactage (**tableaux 12 et 13**).

## ■ Tableaux de compactage

Les tableaux de compactage des matériaux sont établis selon la modélisation établie au CER, et obtenus avec la même méthode que celle utilisée pour l'élaboration dans le GTR des tableaux de compactage des divers matériaux.

Les résultats obtenus sur les mâchefers YPREMA 1 et YPREMA 2 étant très similaires, les tableaux de compactages sont élaborés en regroupant les deux natures sous le terme générique YPREMA.

Les valeurs obtenues sont comparées dans le **tableau 12** avec celles indiquées dans le guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux Île-de-France.

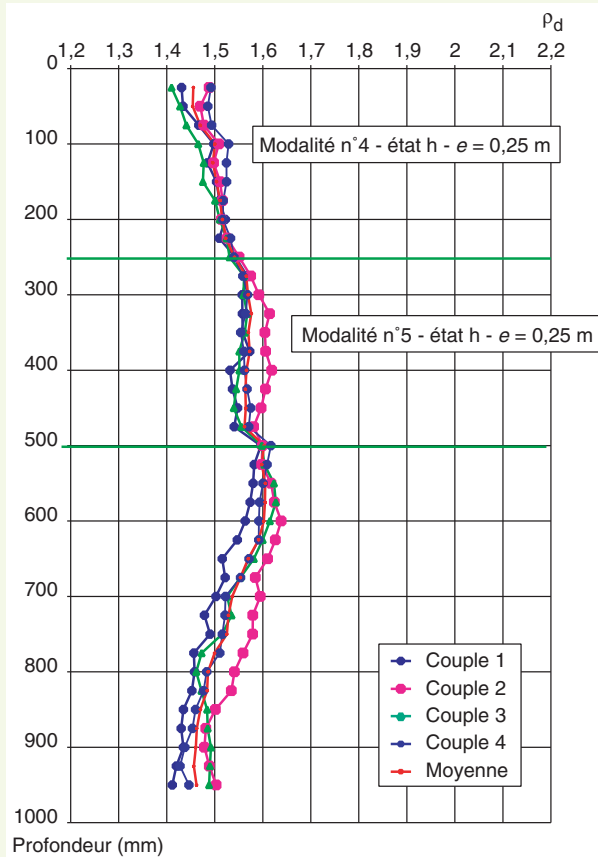
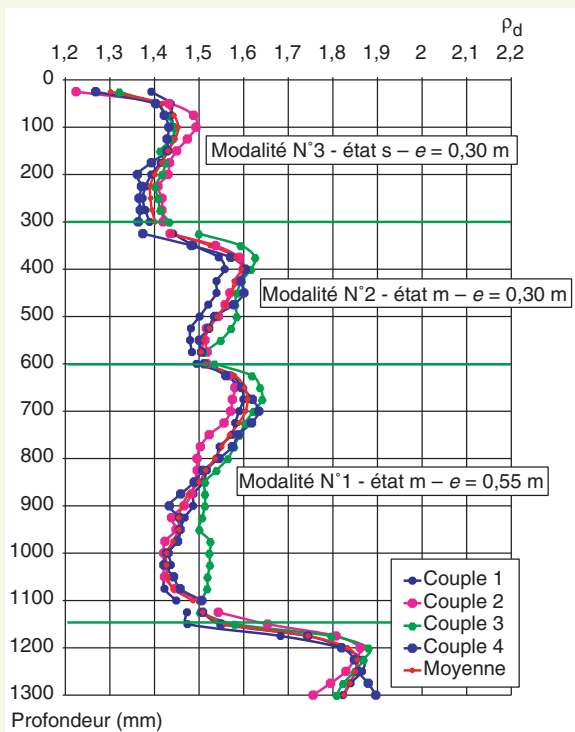
**tableau 12**  
Tableau de compactage  
des mâchefers SMEDAR  
et YPREMA comparés au  
tableau du guide régional  
Île-de-France.

Remblai objectif q4

		Smedar	Yprema	G. IDF	Smedar	Yprema	G. IDF	Smedar	Yprema	Guide IDF	Smedar	Yprema	Guide IDF	Smedar	Yprema	Guide IDF
Etat	para- mètres	V1			V2			V3			V4			V5		
h	Q/s	0,040	0,020	0,060	0,070	0,035	0,095	0,115	0,055	0,145	0,150	0,075	0,195	0,185	0,100	0,235
	e (m)	0,25	0,20	0,30	0,35	0,25	0,40	0,30	0,45	0,30	0,60	0,30	0,60	0,30	0,75	0,25
	V	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,5	3,0	2,0	3,0	2,0	5,0	2,5	5,0	2,0	4,0
	N	6	10	5	5	7	5	3	4	6	8	3	5	2	4	3
	Q/L	80	40	120	140	70	240	345	230	165	110	725	365	600	300	225
m	Q/S	0,025	0,020	0,030	0,045	0,035	0,050	0,065	0,050	0,075	0,090	0,075	0,100	0,115	0,090	0,120
	e(m)	0,20	0,20	0,20	0,30	0,25	0,30	0,30	0,40	0,30	0,35	0,30	0,45	0,30	0,60	0,30
	V	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,5	2,0	2,5	2,0	3,0	2,0	3,5	2,0	3,5
	N	8	10	7	7	7	6	5	6	6	7	4	6	4	6	3
	Q/L	50	40	60	90	70	100	162,5	130	125	100	225	150	315	180	210
s	Q/S						0,030		0,020		0,020	0,040		0,030		0,030
	e(m)						20		20		20		30		30	
	V						2		2,0		2,0		2,0		2,0	
	N						7		10		10		8		10	
	Q/L						60		40		40		80		60	

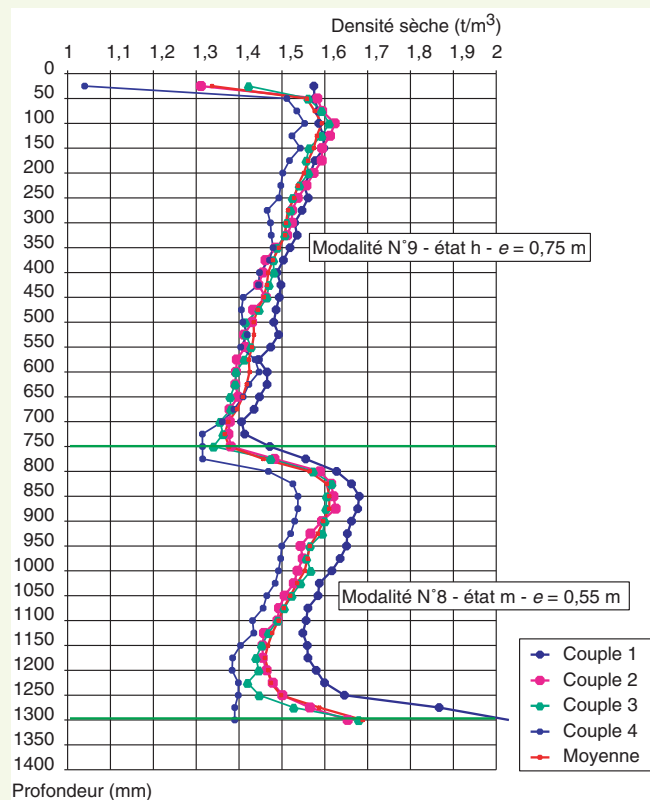
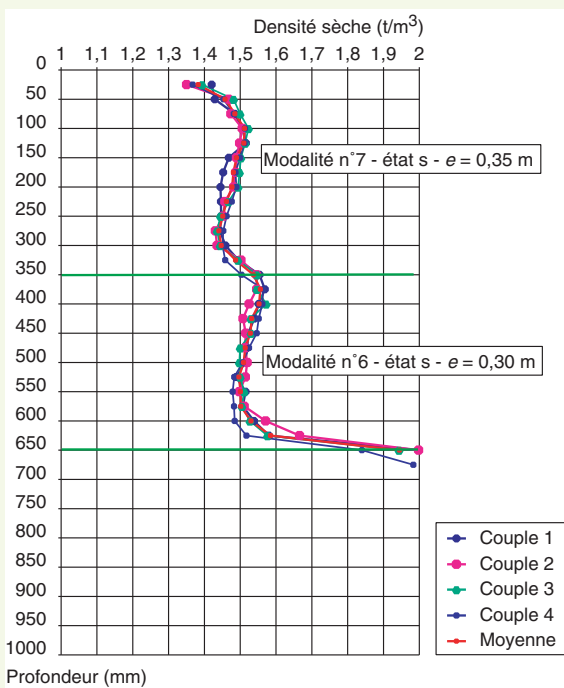
Couche de forme objectif q3

		Smedar	Yprema	G. IDF	Smedar	Yprema	G. IDF	Smedar	Yprema	Guide IDF	Smedar	Yprema	Guide IDF	Smedar	Yprema	Guide IDF
Etat	para- mètres	V1			V2			V3			V4			V5		
m	Q/S				0,02	0,015	0,02	0,03	0,025	0,03	0,04	0,035	0,04	0,05	0,045	0,05
	e(m)				0,20	0,20	0,20	0,30	0,25	0,30	0,30	0,40	0,30	0,50	0,30	0,50
	V				2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,5	2,0	2,5	2,0	3,0	2,0
	N				10	14	10	10	10	10	8	10	9	10	7	10
	Q/L				40	30	40	60	50	60	100	80	85	70	100	135



figures 8 et 9

Valeurs de densités sèches en fonction de la profondeur à l'état de compactage final pour le matériau SMEDAR.



figures 10 et 11

Valeurs de densités sèches en fonction de la profondeur à l'état de compactage final pour le matériau YPREMA 1.



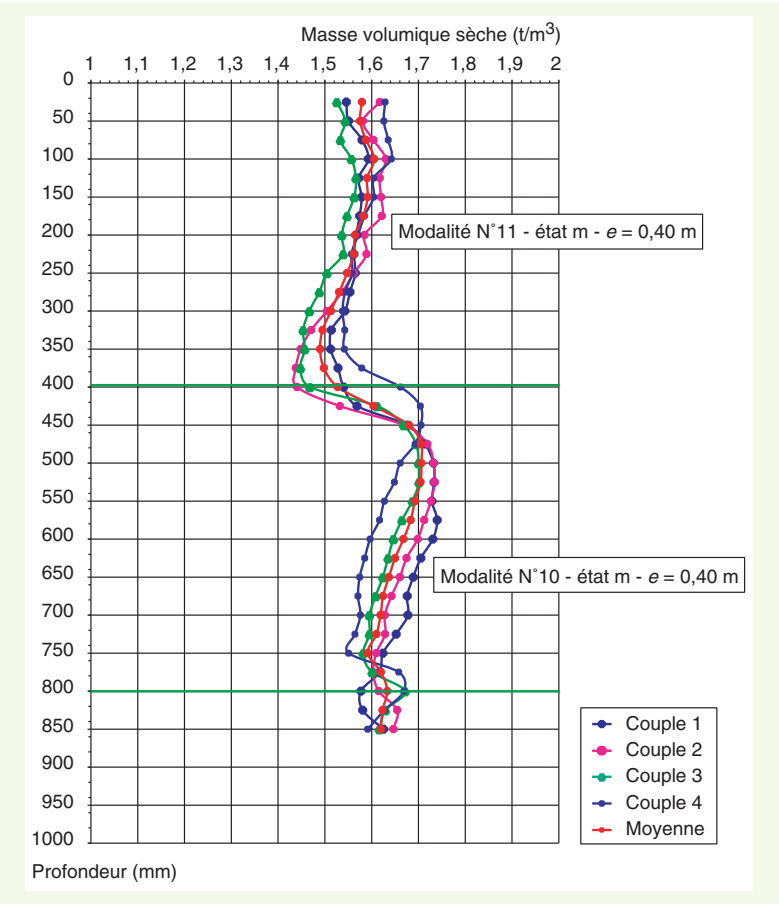


figure 12  
Valeurs de densités  
sèches en fonction de la  
profondeur à l'état de  
compactage final pour le  
matériau YPREMA 2.



figure 13  
Double sonde gamma  
GDS200.

tableau 13  
Tableau de compactage  
préconisé pour l'ensemble  
des mâchefers.

Remblai 4 tous

État	paramètres	P1	P2	V1	V2	V3	V4	V5	VP/SP	PQ3	PQ4
h	Q/S	0,030	0,045	0,020	0,035	0,055	0,075	0,100			0,030
	e(m)	0,20	0,25	0,20	0,25	0,30	0,40	0,30	0,50	0,30	0,60
	V	5,0	5,0	2,0	2,0	3,0	2,0	3,0	2,0	4,0	2,0
	N	7	6	10	7	6	8	4	7	3	6
	Q/L	150	225	40	70	165	110	225	150	400	200
m	Q/S	0,030	0,040	0,020	0,035	0,050	0,075	0,090			0,025
	e(m)	0,20	0,25	0,20	0,25	0,30	0,35	0,30	0,45	0,30	0,55
	V	5	5	2,0	2,0	2,5	2,0	3,0	2,0	3,5	2,0
	N	7	7	10	7	6	7	5	6	3	6
	Q/L	150	200	40	70	125	100	210	140	315	180
s	Q/S					0,020		0,030		0,035	
	e(m)					0,20		0,30		0,35	
	V					2,0		2,0		2,0	
	N					10		10		10	
	Q/L					40		60		70	

Couche de forme 3

État	paramètres										
m	Q/S		0,020		0,015	0,025	0,035	0,045			0,015
	e(m)		0,20		0,20		0,25	0,30	0,35	0,30	0,45
	V		5,0		2,0		2,0	2,5	2,0	3,0	2,0
	N		10		14		10	9	10	7	10
	Q/L		100		30		50	85	70	135	90

Dans tous les cas, le mâchefer YPREMA est plus difficile à compacter que le mâchefer SMEDAR. Les valeurs du matériau le plus difficile sont celles à retenir pour un tableau unique des conditions de compactage du mâchefer. En remblai, pour les états m et h, les compacteurs V4 et V5 sont capables de compacter des couches d'épaisseurs comprises entre 45 et 60 cm. On note que la très grande difficulté de compacter à l'état sec fait que les Q/S sont divisés par un facteur 2,5 par rapport à l'état m, et que les conditions qui en découlent sont en retrait de celles édictées pour les couches de forme à un état m.

La comparaison des modalités de compactage du guide Île-de-France montre une légère surévaluation pour les couches de forme. Les modalités de compactage en remblai sont par contre nettement surévaluées. Cela provient du fait que les modalités de compactage sont la reprise de celles d'un matériau B5 du GTR.

En conclusion, les mâchefers ne peuvent pas être assimilés pour le compactage à la classe des sols B5. Ils sont de fait plus difficiles à compacter, et des tableaux de compactage spécifiques ([tableau 13](#)) alignés sur le mâchefer YPREMA sont préconisés.

Dans le [tableau 13](#), l'extension des conditions de compactage aux compacteurs à pneus et aux plaques vibrantes a été réalisée en tenant compte de la difficulté de compactage du mâchefer. Les compacteurs à pieds, vibrants ou statiques, sont inadaptés à ce type de matériau.

## CARACTÉRISATION DU CONTRÔLE DE COMPACTAGE AU PÉNÉTROMÈTRE DYNAMIQUE

### ■ Détermination des droites limite et de référence

L'objectif est de définir les droites limite et de référence spécifiques au mâchefer afin de pouvoir effectuer des contrôles de compactage en fonction B de la norme XP P 94-063. Le pénétromètre utilisé est le PDG1000 [23], à énergie constante ([figure 14](#)). On rappelle qu'en fonction B, chaque pénétromètre a un étalonnage particulier, dépendant de ses caractéristiques propres.

A l'issue de la réalisation des planches d'essai et des mesures de densité effectuées avec la double sonde gamma GDS200, les contrôles pénétrométriques ont été effectués.

**figure 14**  
*Pénétromètre dynamique  
PDG1000.*





Le but de ces mesures est de déterminer une équation de la forme :

$$\log(e_c) = aW + bT + cZ + d \text{ pour } Z < Z_{\text{critique}} \text{ et } \log(e_c) = aW + bT + d' \text{ pour } Z > Z_{\text{critique}}$$

- avec  $e_c$  : enfoncement par coup du PDG1000 (mm/coup)
- $W$  : teneur en eau du matériau (%)
- $T$  : taux de compactage mesuré à la GDS2000 (%)
- $Z$  : profondeur (cm)
- $a, b, c, d, d'$  : coefficients

Les droites  $e_c = f(T)$  sont tracées pour chacune des modalités réalisées. Le **tableau 14** représente le résultat obtenu pour le mâchefer SMEDAR. Pour chacune des droites, on identifie les points où  $e_c$  ne dépend que d'un seul des 3 paramètres  $W, T$  ou  $Z$ .

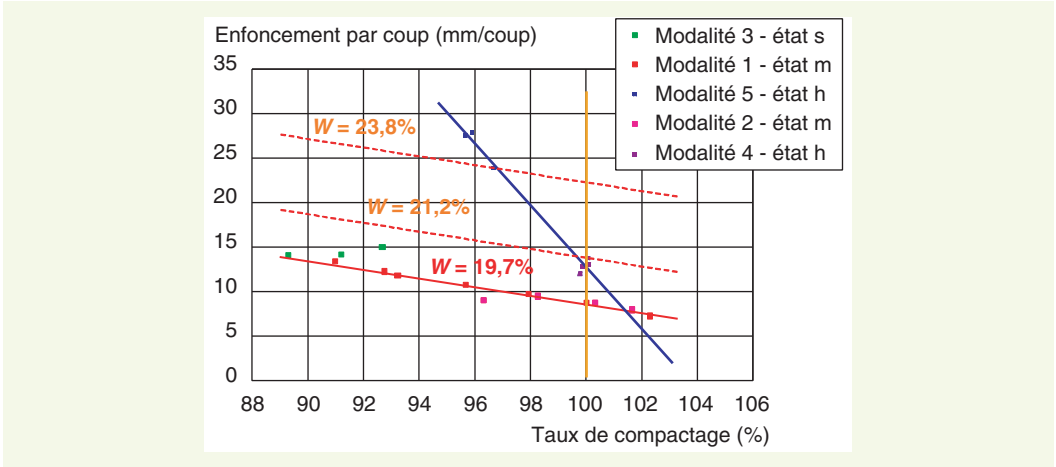
Ainsi, à  $T = \text{constante}$  (par exemple  $T = 100$  sur la **figure 15**), les points situés à une profondeur supérieure à 60 cm de profondeur ne sont plus influencés par la profondeur. Ces points autorisent alors à faire une corrélation entre  $e_c$  et  $W$ , ce qui permet de calculer le coefficient  $a$ . La démarche est poursuivie ensuite pour le calcul des coefficients  $b$  et  $c$ .

Pour chacun des 3 mâchefers testés, on obtient les coefficients  $a, b$  et  $c$  (**tableau 14**).

**tableau 14**  
Coefficients des mâchefers testés pour le PDG1000.

Mâchefer	a	b	c
SMEDAR	0,087	- 0,021	- 0,0056
YPREMA 1	0,040	- 0,0216	- 0,0044
YPREMA 2	0,040	- 0,0132	- 0,0044

**figure 15**  
Relation  $e_c = f(T)$ .



Selon la norme XP P 94-063, pour chaque état hydrique et chaque objectif de densification q4 ou q3, on détermine des enfoncements par coup limite ( $e_L$ ) et de référence ( $e_R$ ) tels que pour  $Z > Z_{\text{critique}}$  on ait :

$$e_L = f(W = W_{\text{borne supérieure de la sous classe}}, T = T_{\text{fond de couche}} \text{ de q4 ou q3}).$$
$$e_R = f(W = W_{\text{moyenne de la sous classe}}, T = T_{\text{moyen}} \text{ de q4 ou q3}).$$

La résolution des équations ci-dessus permet d'établir les points suivants pour le mâchefer SMEDAR (**tableau 15**).

On note qu'en q3 des états h et s sont prévus pour tenir compte de la teneur en eau au moment du contrôle. Ils ne contredisent pas les tableaux de compactage où seul l'état m est préconisé pour obtenir l'objectif q3.

**tableau 15**  
Valeurs des enfoncements  
limite et de référence (mm/  
coup) en q4 et q3 pour le  
mâchefer SMEDAR.

objectif q4

	Etat h		Etat m		Etat s	
Z (cm)	e <sub>L</sub>	e <sub>R</sub>	e <sub>L</sub>	e <sub>R</sub>	e <sub>L</sub>	e <sub>R</sub>
20	44	31	33	14	17	9,5
30	39,5	28				
40			26,5	11		
60	28 (1)	20 (1)	21 (1)	9 (1)	10,5	6
100	39,5	28	26,5	11	10,5	6

Objectif q3

	Etat h		Etat m		Etat s	
Z	e <sub>L</sub>	e <sub>R</sub>	e <sub>L</sub>	e <sub>R</sub>	e <sub>L</sub>	e <sub>R</sub>
20	36	26	27,5	11,5	13,5	8
30	32	23,5				
40			22	9		
60	22,5	16,5	17,5	7	8,5	5
100	32	23	22	9	8,5	5

(1) uniquement pour le tracé de DL, DR jusqu'à Z critique ; le logiciel du PDG1000 tant fondé sur les points de passage à 20 et 60 cm.

Les valeurs  $Z_{critique}$  sont :  
 – état h :  $Z_{critique} = 30\text{ cm}$   
 – état m :  $Z_{critique} = 40\text{ cm}$   
 – état s :  $Z_{critique} = 60\text{ cm}$ .

Pour  $Z > Z_{critique}$  on vérifie les conditions  $e_L/e_R$  de la norme XP P 94-063.

### ■ Détermination des sous-classes d'état hydrique

On observe une grande différence entre les valeurs limite et de référence de l'enfoncement par coup pour l'état hydrique moyen tant en q4 que q3. L'origine de cet écart important vient de la définition même de l'état hydrique moyen ( $0,8 W_{OPN} < W_n < 1,2 W_{OPN}$ ) dans le guide Ile-de-France. La largeur de cette plage est grande. Elle conduit à positionner la droite limite de façon trop permissive pour pouvoir déterminer finement les insuffisances de compactage (avec la règle de ne pas conclure à tort lorsqu'on est près de la frontière m/h).

Cette largeur est d'autant plus permissive que la définition de l'anomalie de type 4 dans la norme XP P 94-063 prévoit que le dépassement de la droite  $D_L$  par le pénétrogramme atteigne une amplitude supérieure à la distance entre les droites  $D_L$  et  $D_R$ .

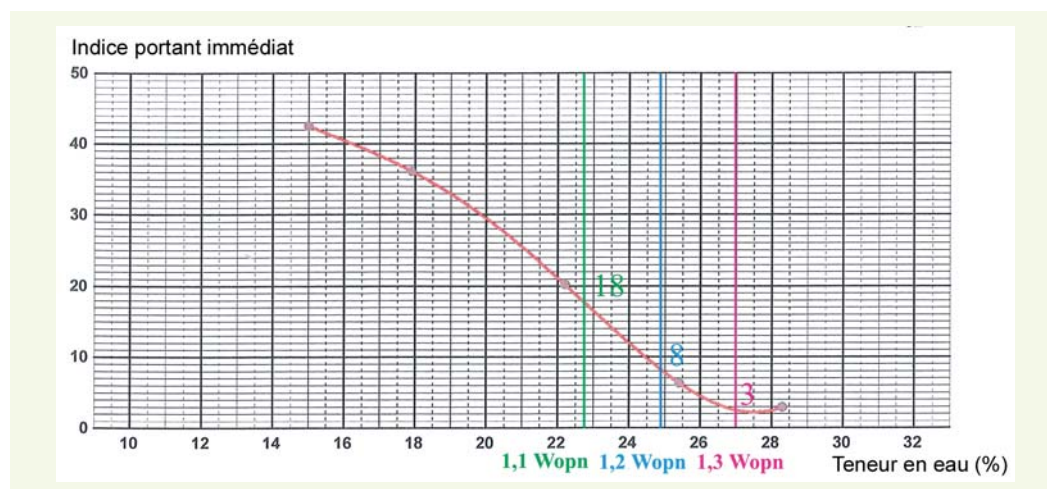
De plus la sensibilité de l'enfoncement par coup du pénétromètre avec la densité est nettement inférieure pour le mâchefer à ce que l'on observe sur un matériau moyen (coeff.  $b$  de  $\log(e_c) = bT + d$  égal à  $-0,021$  comparé à  $-0,04$  en moyenne des sols).

Il est donc proposé de changer la définition des frontières m/h et h/th comme suit :

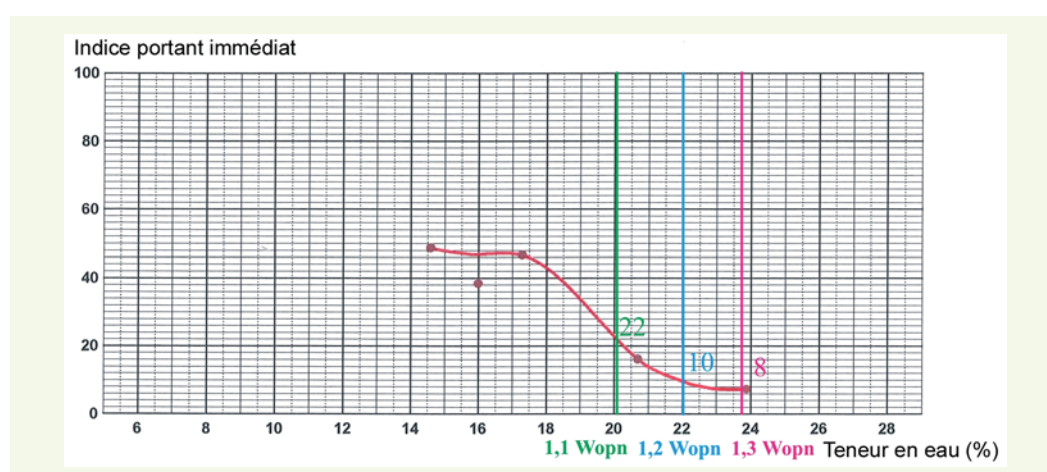
$$\begin{aligned} \text{état m : } & 0,8 W_{OPN} \leq W_n < 1,1 W_{OPN} \\ \text{état h : } & 1,1 W_{OPN} \leq W_n < 1,2 W_{OPN} \end{aligned}$$

Les modifications des bornes d'état hydriques pour être validées, demandent à être rapprochées des courbes d'indice portant immédiat (*IPi*) des matériaux SMEDAR et YPREMA ayant servi pour les essais (figures 16 et 17).

**figure 16**  
Courbe IPI du mâchefer  
SMEDAR.



**figure 17**  
Courbe IPI du mâchefer  
YPREMA.



Les bornes du guide Ile-de-France indiquent comme correspondances (cf. [tableau 1](#)) :

- $IPI < 10$  pour  $W > 1,3 W_{OPN}$  ( $IPI$  prioritaire)
- $10 \leq IPI < 20$  pour  $1,2 W_{OPN} \leq W \leq 1,3 W_{OPN}$  ( $W$  prioritaire)
- $IPI > 20$  pour  $W < 1,2 W_{OPN}$  ( $W$  prioritaire)

On constate que les valeurs d'IPI obtenues ne concordent pas avec les bornes du guide mais sont plus en adéquation avec les propositions de modification énoncées.

Les modifications des bornes aboutissent à un nouveau calcul des droites limite et de référence des mâchefers ([tableau 16](#)).

Les valeurs les plus grandes (celles correspondant au mâchefer SMEDAR) sont retenues comme valeurs finales pour l'ensemble des mâchefers afin de ne pas déclarer non conforme un compactage qui serait satisfaisant.

La modification des bornes h et m change la position des droites limites et de référence de la façon suivante.

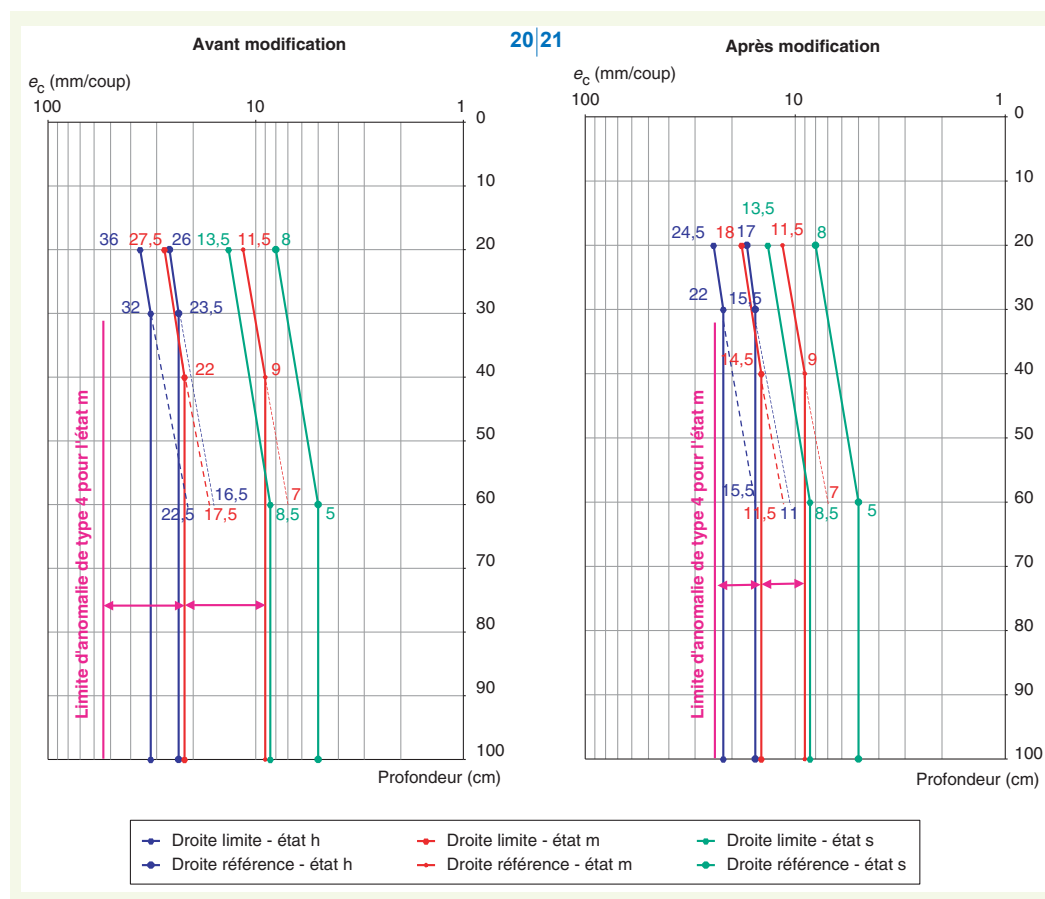
Les [figures 18 à 21](#) montrent l'intérêt du changement des bornes d'état hydrique pour pouvoir détecter les plus grosses anomalies de compactage des pénétromètres. Il convient de souligner qu'en raison de la dispersion des mâchefers, et par suite des références OPN, les contrôles par mesure de densité semblent illusoire en chantier.

Les modifications des bornes préconisées pour les états m et h ne changent pas pour autant le [tableau 13](#) des conditions de compactage, car la difficulté de compactage du matériau à l'état h est encore proche de celle à l'état m.



figures 20 et 21

Modification des droites limite et de référence en  $q_3$  par la modification des frontières m/h et h/th et exemple d'anomalie de type 4 à l'état m.



## CONCLUSIONS

L'exploitation des nombreux résultats expérimentaux obtenus sur les trois natures de mâchefers testées entre 2002 et 2005 au CER de Rouen peut conduire à diverses conclusions pratiques.

Une assimilation des mâchefers à un sol classique, par exemple B4 à B6, est insuffisante pour traduire son comportement particulier.

Il s'agit d'un matériau sensible à l'eau, au sens où la variation de l'IPI avec la teneur en eau le montre. Et c'est un matériau dont le caractère évolutif par fragmentation et attrition a pu être mis en évidence davantage par les essais de compactage répétés que par les caractéristiques LA ou FR. Les parties basses des courbes granulométriques peuvent aisément s'accroître de 5 % en valeur absolue, et les références Proctor de 10 % en relatif.

Les grains présentent une porosité qui renferme une partie de l'eau libre : 15 % de celle-ci est présente dans la fraction supérieure à 10 mm. Après des tests avec divers protocoles, la caractérisation des états d'humidité est faite sur la base d'essais de teneur en eau à 105 °C pendant 3 jours.

Les essais en laboratoire avec la VCPC, et les essais de compactage sur planche d'essais, confirment la très grande difficulté de compactage des mâchefers à l'état sec, et la conservation d'une difficulté encore moyenne jusqu'à l'état h inclus.

On note également un caractère à la fois élastique et, semble-t-il absorbant d'énergie, des mâchefers qui fait que les essais de portance conduisent à des valeurs plutôt faibles en place, au regard du comportement satisfaisant au roulement des engins.

Les modules EV2 ne dépassent pas 70 MPa en fin de compactage, et l'une des trois natures conduit à des valeurs inférieures à 50 MPa à l'état sec. Par dérogation, des valeurs-seuil de 35 MPa pourraient être admises pour une couche de forme PF2 en mâchefer.

Les caractéristiques ci-dessus sont communes aux mâchefers testés. Il n'en reste pas moins qu'il est difficile de caractériser « un » mâchefer. Un même site de production génère en fonction des époques des matériaux dont  $W_{OPN}$  peut varier entre 15 et 21 %, la variabilité sur  $\rho_{OPN}$  semblant mieux contenue. Un stock donné est lui-même quelque peu dispersé et nécessite d'être échantillonné en plusieurs endroits. Ceci étant, les valeurs OPN « moyennes » de chacune des trois natures sont au final assez proches : densités entre 1,57 et 1,61 et  $W$  entre 18 et 20 %.

Des tableaux de compactage du type de ceux du GTR pour les remblais et les couches de forme ont pu être produits pour « le » mâchefer. Ils sont définis sur la base de la nature qui s'est montrée la plus difficile à compacter. Toutefois, quelles que soient les natures, si l'on tient compte de leur caractère propre, comme cela a été fait dans l'analyse, les conditions de compactage individualisées restent en deçà de celles d'un sol B5.

Le contrôle en place par densité est illusoire compte tenu de la variabilité spatiale et de l'évolutivité précitée.

La détermination de droites limite et de référence pour la méthode de contrôle par pénétromètre à énergie constante a abouti à la définition des valeurs-seuil pour un modèle de pénétromètre. Elles ont été choisies en rapport avec la nature de mâchefer la plus « tolérante » pour éviter de conclure à tort sur les autres natures. Cependant, la méthode, qui nécessite de classer en état h, m ou s le mâchefer, n'est pas pertinente si les intervalles de teneur en eau sont trop étendus, d'autant que la sensibilité au paramètre densité est moins grande pour le mâchefer que pour la moyenne des sols.

L'étude amène ainsi à proposer une définition du classement des sous-classes d'état légèrement différentes de celle du guide régional Île-de-France, et plus en conformité avec les valeurs d'IPI :

état m :  $0,8 W_{OPN} \leq W_n < 1,1 W_{OPN}$  (au lieu de  $0,8$  à  $1,2 W_{OPN}$ )

état h :  $1,1 W_{OPN} \leq W_n < 1,2 W_{OPN}$  (au lieu de  $1,2$  à  $1,3 W_{OPN}$ ).

Cette modification ne perturbe en rien les tableaux des conditions de compactage qui ont été établies. On pourrait même rendre prioritaire les critères d'IPI aussi bien pour les états h et m que pour l'état th, connaissant la difficulté à obtenir une valeur moyenne  $W_{OPN}$  assez précise.

Les renseignements obtenus ont donc pu être traduits dans un contexte opérationnel qui constitue un progrès par rapport aux éléments de connaissance antérieurs.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1 Norme NF P 11-300, Exécution des terrassements – Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructure routière, *Afnor*, **septembre 1992**.
- 2 Norme XP P 94-063, Contrôle de la qualité du compactage – Méthode au pénétromètre dynamique à énergie constante, *Afnor*, **août 1997**.
- 3 Norme XP P 94-105, Contrôle de la qualité du compactage – Méthode au pénétromètre dynamique à énergie variable, *Afnor*, **août 1997**.
- 4 Conseil régional Île-de-France, *Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Île-de-France « Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères »*, **novembre 1998**.
- 5 Norme NF P 94-056, Sols : reconnaissance et essais, analyse granulométrique, Méthode par tamisage à sec après lavage, *Afnor*, **décembre 1992**.
- 6 Norme NF P 94-093, Sols : reconnaissance et essais, Détermination des références de compactage d'un matériau. *Essai Proctor normal et essai Proctor modifié*, **septembre 1997**.
- 7 Norme NF P 18-573, Granulats, Essai Los Angeles, *Afnor*, **décembre 1990**.
- 8 Norme NF P 18-572, Granulats, Essai d'usure micro Deval, *Afnor*, **juin 2005**.
- 9 Norme NF P 94-066, Sols : reconnaissance et essais – Coefficient de fragmentabilité des matériaux rocheux, *Afnor*, **décembre 1992**.
- 10 Norme NF P 94-067, Sols : reconnaissance et essais, Coefficient de dégradabilité des matériaux rocheux, *Afnor*, **décembre 1992**.
- 11 Norme NF P 94-068, Sols : reconnaissance et essais – Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse, Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol par l'essai à la tache, *Afnor*, **novembre 1993**.

- 12 Norme NF P 94-078, Sols : reconnaissance et essais – Indice CBR après immersion, Indice CBR immédiat, Indice Portant Immédiat, *Afnor*, **mai 1997**.
- 13 Norme NF P 98-231-3, Essais relatifs aux chaussées – Détermination du comportement au compactage des matériaux d'assises autre que traités aux liants hydrocarbonés, Détermination de la masse volumique maximale de référence et de la difficulté de compactage par essai de vibrocompression à paramètres contrôlés (VCPC), *Afnor*, **décembre 1992**.
- 14 **EVAIN E.**, Caractérisation géotechnique du mâchefer – Valorisation du mâchefer de l'unité Vesta à Rouen, Rapport d'étape 1 et plan d'actions, **septembre 2003**.
- 15 Setra, LCPC, Guide technique « Réalisation des remblais et des couches de forme », **septembre 1992**.
- 16 **QUIBEL A.**, Modélisation pratique du compactage par vibration, *Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées*, 192, **1994**, 27-35
- 17 **EVAIN E.**, Conditions de mise en œuvre et contrôle de compactage du mâchefer Smedar, Rapport d'étape 2, **décembre 2003**.
- 18 **EVAIN E.**, Conditions de mise en œuvre et contrôle de compactage du mâchefer YPREMA, Rapport d'étape 3, **mars 2005**.
- 19 **EVAIN E.**, Conditions de mise en œuvre et contrôle de compactage du mâchefer, Rapport d'étape 4, *juillet 2006*.
- 20 Norme NF P 98-736, Matériels de construction et d'entretien des routes, Compacteurs, Classification, **septembre 1992**.
- 21 Norme NF P 94-117-1, Sols : reconnaissance et essais, Portance des plates-formes, Module sous chargement statique à la plaque (EV2), *Afnor*, **avril 2000**.
- 22 Norme NF P 94-062, Sols : reconnaissance et essais, Mesure de la masse volumique en place par diagraphie à la double sonde gamma, *Afnor*, **août 1997**.
- 23 Contrôle du compactage des remblais au moyen du pénétrodensitographe LPC : le PDG100, *Rapport des laboratoires GT35*, **1989**.