

GUIDE TECHNIQUE POUR L'UTILISATION DES MATERIAUX ALTERNATIFS DE BOURGOGNE

Les graves issues des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux



Sommaire

I.	Introduction et état des lieux en Bourgogne	3
II.	Gisement	4
A.	Origines des matériaux : quantités et perspectives	4
B.	Procédés de production	5
C.	Nature des graves de mâchefers	7
D.	Le suivi qualité des IME des graves de mâchefers	7
III.	Domaine d'emploi	9
A.	Conditions environnementales d'utilisation des graves de mâchefers	9
1.	Les caractéristiques environnementales intrinsèques des graves de mâchefers ...	9
2.	Les critères de recyclage liés à l'environnement immédiat de l'ouvrage routier....	11
B.	Les conditions géotechniques d'utilisation des graves de mâchefers	12
1.	Les caractéristiques géotechniques intrinsèques.....	12
2.	La classification géotechnique des graves de mâchefers	14
C.	Utilisation en remblai.....	14
1.	Conditions d'emploi.....	14
2.	Action sur la teneur en eau	16
3.	Compactage.....	17
D.	Utilisation en couche de forme.....	18
1.	Condition d'emploi	18
2.	Dimensionnement	18
3.	Compactage.....	19
4.	Protection.....	19
5.	Graves de mâchefers traitées au liant hydraulique pour une utilisation en couche de forme.....	19
E.	Utilisation en assise de chaussée	20
1.	Conditions d'emploi.....	20
2.	Compactage.....	20
	Annexe 1 : Glossaire	21
	Annexe 2 : Bibliographie.....	23
	Annexe 3 : Liste de références.....	25
	Annexe 4 : Caractérisations géotechniques des graves de mâchefers élaborées en région de Bourgogne	26

I. Introduction et état des lieux en Bourgogne

La gestion des déchets est un enjeu majeur qui s'inscrit durablement dans les politiques publiques initiées par le Grenelle de l'Environnement.

En Bourgogne, 832 000 tonnes de déchets ménagers et assimilés ont été collectées en 2006, dont 15 à 20 % ont été incinérés (ADEME Bourgogne). 55% sont des déchets ménagers le restant est composé par les collectes d'emballages de journaux et de magazines, de verre, de produits spécifiques, des déchèteries, des bio-déchets et des déchets verts.

L'incinération est un mode de traitement des déchets non dangereux qui consiste à les brûler à haute température. Ce traitement thermique permet une réduction des déchets de 75% en masse et de 90% en volume (J. Bertholon *et al.*, 2002).

Ce procédé de traitement des déchets non dangereux produit une quantité importante de mâchefers qu'il convient de valoriser. Cet objectif, associé à la volonté de réduire l'impact environnemental (préservation des ressources naturelles, réduction des transports, dynamisation de l'économie régionale), conduit à privilégier la valorisation des mâchefers dans les techniques routières.

La valorisation des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux (MIDND), anciennement dénommés MIOM, en technique routière doit être réalisée de manière à satisfaire les prescriptions environnementales fixées par l'arrêté ministériel du 18 novembre 2011, ainsi que les critères géotechniques et mécaniques pour l'usage routier envisagé.

Dans le souci de mettre à disposition des différents acteurs Bourguignons de la construction et des Travaux Publics une aide au choix des matériaux, ce guide régional, reconnu par l'ensemble des acteurs des Travaux Publics, présente d'une part le gisement des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux et, d'autre part, les caractéristiques intrinsèques des graves de mâchefers qui en résultent, ainsi que leurs conditions d'emploi en technique routière.

II. Gisement

A. Origines des matériaux : quantités et perspectives

La totalité du gisement de Mâchefers d'Incinération de Déchets Non Dangereux (MIDND) issu des activités d'incinération des déchets non-dangereux en BOURGOGNE est de 35 000 tonnes, en 2010.

L'incinération engendre des déchets secondaires sous diverses formes : pour 1000 kg de déchets traités, il en ressort :

- 250 kg de mâchefers d'incinération de déchets non dangereux
- 42 kg de résidus d'épuration des fumées d'incinération de déchets non-dangereux
- 0.05 kg de fines issues des fumées.

Les MIDND représentent environ 25 % en poids des déchets incinérés et environ 10% en volume.

En 2011, on dénombre trois usines d'incinération de déchets non-dangereux (UIDND), anciennement dénommées UIOM, en Bourgogne. La production de mâchefers d'incinération de déchets non-dangereux valorisables (les graves de mâchefers) par rapport aux déchets traités se répartit ainsi :

	UIDND de Dijon (21)	UIDND de Fourchambault (58)	UIDND de Sens (89)
Déchets incinérés	130 000 t	34 400 t	18 000 t
Quantités de MIDND valorisables ou grave de MIDND	24 000 t	7 000 t	4 000 t
Nombre d'habitants <i>(Estimation)</i>	Grand Dijon 250 000	Communauté d'agglomération de Nevers 66 000	Sens et environ 30 000

Tableau 1 : Production de graves de mâchefers en Bourgogne (données 2010)

La répartition de cette production est très contrastée (Tableau 1) et limitée à deux variables majeures : la densité de population et la volonté politique locale de recourir ou non à l'incinération.

Selon les propriétés de ces mâchefers, ils peuvent être valorisés en technique routière, en respectant les contraintes en termes de protection de la ressource en eau, ceci après passage dans une installation de maturation et d'élaboration (IME).

Les mâchefers qui ne seront pas valorisés en technique routière devront :

- Soit être valorisés en couche de recouvrement et matériaux d'aménagement pour ISDND (Installation de Stockage de Déchets Non Dangereux),
- Soit être éliminés en dernier ressort en ISDND.

B. Procédés de production :

La production de graves de mâchefers se fait via les installations de maturation et d'élaboration qui peuvent être internes ou externes à l'UIDND. Les IME disposent souvent de laboratoires internes ou externes qui leur permettent d'élaborer un matériau routier répondant toujours mieux aux attentes des utilisateurs.

Le passage en IME se compose des étapes du schéma suivant :

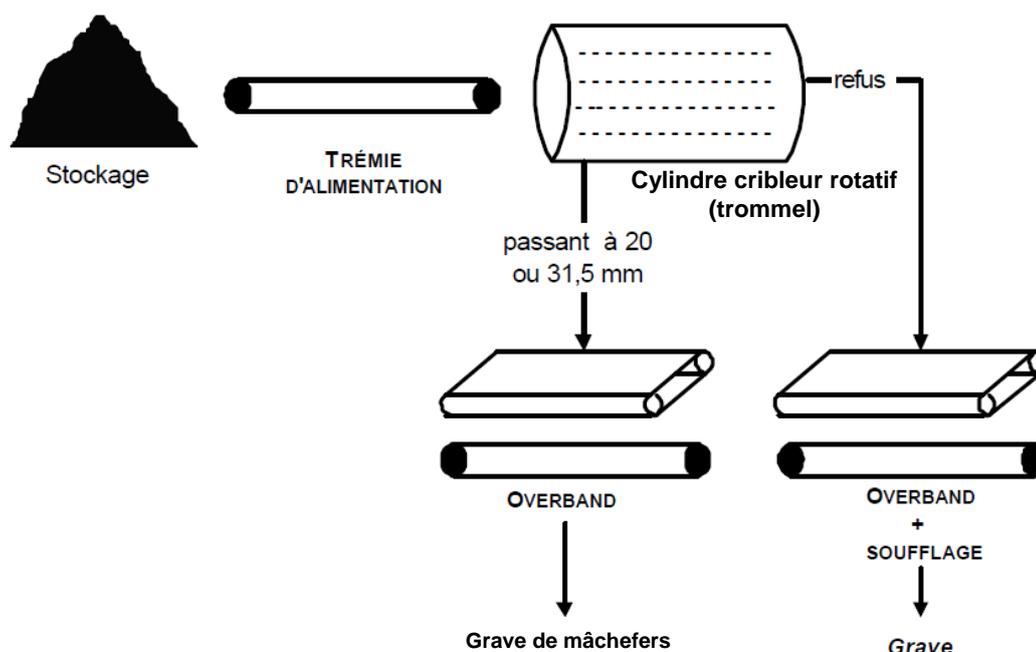


Figure 1 : Exemple de synoptique simplifié d'une Installation de Maturation et d'Elaboration de mâchefers, IME (Centre National de Recyclage, 2001)

Chaque étape se résume en générale de la façon suivante

- Le refroidissement ou extinction : cette étape qui se situe à la sortie du four est généralement réalisée dans un siphon hydraulique. Le MIDND frais présente ainsi une forte teneur en eau.
- Le scalpage : cette étape permet d'enlever tous les éléments grossiers. Elle est assurée par une grille d'une coupure moyenne de 250 à 200 mm. Ces éléments grossiers sont parfois broyés puis remis dans le circuit d'élaboration.
- Le criblage : cette étape permet de calibrer les mâchefers (entre 20 et 31,5 mm) afin de répondre aux exigences des utilisateurs des graves de mâchefers en technique routière. L'unité de criblage est soit représentée par des cribles rotatifs, soit par des cribles plans (vibrants ou non), soit par des cribles à étoiles (plus rares). Certaines IME peuvent ne pas disposer de crible, mais d'un système de concassage permettant d'obtenir la granulométrie recherchée (ADEME, 2002).
- La séparation des imbrûlés légers : cette étape se fait par tri aéraulique avec des techniques de soufflage ou d'aspiration. Les imbrûlés légers ainsi séparés sont généralement retournés vers l'UIDND pour y être incinérés.

- Le déferraillage : les ferreux sont extraits des flux grâce à des unités électromagnétiques ou munis d'aimants (overbands). Les métaux non ferreux tels que l'aluminium et le cuivre sont extraits par des séparateurs à courants de Foucault. L'enlèvement des métaux non magnétiques a deux intérêts : d'une part l'enlèvement de l'aluminium contribue à l'amélioration géotechnique de la grave de mâchefers par limitation des risques de gonflements et, d'autre part, le recyclage des métaux non ferreux permet de profiter d'une valeur marchande non négligeable.

La diversité des procédés d'élaboration des graves de mâchefers dépend de la taille de l'IME.

Une fois séparées, les graves de mâchefers sont entreposées en zone de maturation.

C. Nature des graves de mâchefers :

La composition moyenne des graves de mâchefers peut être définie d'une manière assez générale. Les éléments principaux constitutifs du matériau sont ainsi recensés :

- la silice
- l'alumine
- le calcium
- les sels
- les imbrûlés
- les métaux lourds

Par ailleurs, ces matériaux comportent une teneur en eau, de l'ordre de 15 %.

La figure ci-dessous présente un exemple de composition des graves de mâchefers après le passage en IME:

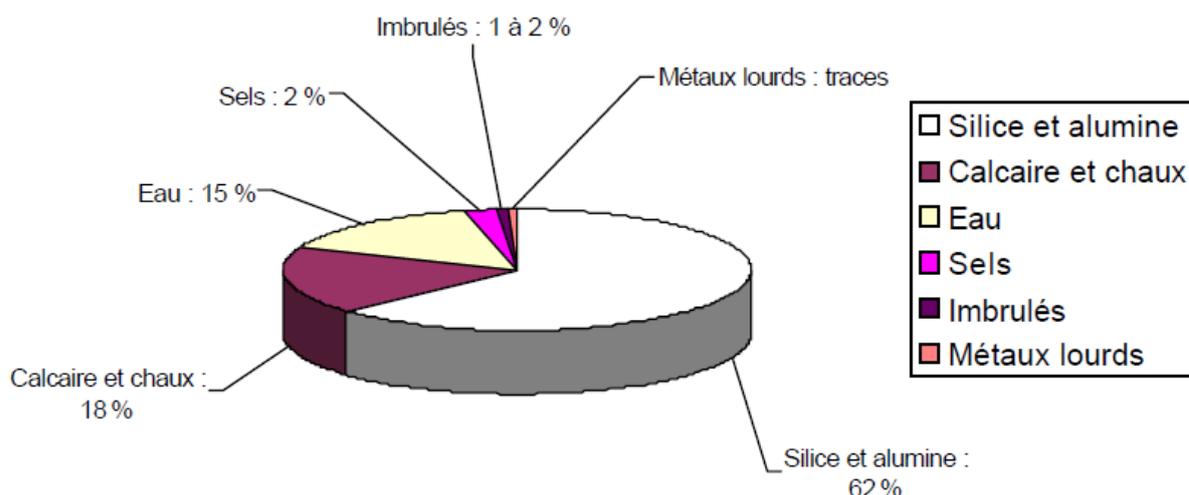


Figure 2 : Composition générale des graves de mâchefers après traitement

Cette composition est susceptible d'évoluer de part l'évolution des procédés de combustion et le développement de la collecte sélective. On peut estimer cette évolution via les analyses périodiques de la composition des graves de mâchefers et les contrôles environnementaux.

D. Le suivi qualité des IME des graves de mâchefers:

Les installations de maturation et d'élaboration des mâchefers (IME) sont des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) relevant des rubriques 2716, 2771 ou 2791 de la nomenclature des installations classées. Elles sont soumises à autorisation préfectorale.

Chaque lot est précisément identifié par sa provenance et sa période de production. Deux lots ne peuvent être mélangés.

La traçabilité des graves de mâchefers est garante de la pérennité de la filière de valorisation de ce matériau. Traçabilité et qualité doivent s'inscrire dans la démarche des exploitants. Pour cela, et aussi pour répondre aux exigences des utilisateurs, l'ensemble des mesures

prises par l'exploitant ainsi que les analyses réalisées pour assurer la qualité des graves de mâchefers valorisés sont à rassembler dans **le Plan d'Assurance Qualité**.

➤ **Le Plan d'assurance qualité :**

L'objectif de ce plan est de constituer une fiche d'identité des graves de mâchefers. Il recense les éléments suivants :

- le procédé d'élaboration des graves de mâchefers (tri, maturation, etc.) ;
- les essais et résultats quant à la granulométrie, la densité sèche et humide, la teneur en eau, l'analyse chimique, l'Indice Portant Immédiat (IPI) éventuel et la résistance au compactage.

Le Plan d'Assurance Qualité rappelle également aux utilisateurs les préconisations pour l'utilisation des graves de mâchefers. Cet outil doit permettre d'assurer le suivi du produit afin de rassurer l'utilisateur quant à l'utilisation de résidus de traitement de déchets non dangereux.

➤ **des Fiches Techniques Produits avec**

- Nom de l'entreprise productrice,
- Lieu de production
- Date de production (du ... au ...)
- La classification des matériaux
- Les caractéristiques intrinsèques

La tenue du registre de traçabilité de l'IME et l'établissement de la fiche de traçabilité incombent à l'exploitant de l'IME. L'utilisateur fournira les renseignements nécessaires au bon établissement de ces documents.

Avant la livraison sur le chantier routier ou au moment de celle-ci, ou lors de la première d'une série de livraisons d'une même grave de mâchefers, l'exploitant de l'IME fournit également à l'entreprise chargée de l'exécution des travaux routiers une fiche de données environnementales indiquant :

- les usages routiers autorisés compte tenu des caractéristiques environnementales de la grave de mâchefers ;
- les limitations d'usage liées à l'environnement immédiat de l'ouvrage routier ainsi que celles liées à la mise en œuvre de la grave de mâchefers.

Sont annexées à cette fiche les résultats de l'étude du comportement à la lixiviation et l'évaluation de la teneur intrinsèque en éléments polluants (cf. chapitre III A 1 ci-dessous).

Conformément à l'annexe I de l'arrêté ministériel du 18 novembre 2011, la mise en œuvre de graves de mâchefers doit être effectuée de façon à limiter les contacts avec les eaux météoriques, superficielles et souterraines. A ce titre, la quantité de graves de mâchefers stockée temporairement dans l'emprise d'un chantier routier donné doit être limitée aux seuls besoins permettant de s'affranchir de l'irrégularité des approvisionnements du chantier, sans que jamais cette quantité n'excède 1000 m³.

III. Domaine d'emploi

Conformément à l'annexe I de l'arrêté ministériel du 18 novembre 2011, les usages routiers autorisés sont ceux, au sein d'ouvrages routiers revêtus ou recouverts, des types 1 et 2 définis ci-après.

Les usages routiers de type 1 sont les usages d'au plus trois mètres de hauteur en sous-couche de chaussée ou d'accotement d'ouvrages routiers revêtus : remblai sous ouvrage, couche de forme, couche de fondation, couche de base, et couche de liaison.

Les usages routiers de type 2 sont les usages d'au plus six mètres de hauteur en remblai technique connexe à l'infrastructure routière ou en accotement, dès lors qu'il s'agit d'usages au sein d'ouvrages routiers recouverts.

Relèvent également des usages routiers de type 2, les usages de plus de trois mètres et d'au plus six mètres de hauteur en sous-couche de chaussée ou d'accotement d'ouvrages routiers revêtus.

Un ouvrage routier est réputé revêtu si sa couche de surface est réalisée à l'aide d'asphalte, d'enrobés bitumineux, d'enduits superficiels d'usure, de béton, de ciment ou de pavés jointoyés par un matériau lié, et si elle présente en tout point une pente minimale de 1%.

Un ouvrage routier est réputé recouvert si les matériaux routiers qui y sont présents sont recouverts par au moins 30 centimètres de matériaux naturels, et s'il présente en tout point de son enveloppe extérieure une pente minimum de 5%.

L'utilisation de graves de mâchefers est interdite pour la réalisation de systèmes drainants et de travaux de préchargement.

A. Conditions environnementales d'utilisation des graves de mâchefers

1. Les caractéristiques environnementales intrinsèques des graves de mâchefers :

Conformément à l'arrêté ministériel du 18 novembre 2011, les graves de mâchefers sont caractérisées selon leur comportement à la lixiviation (norme NF EN 12457-2) et selon leur teneur intrinsèque en éléments polluants, par lot périodique.

Un lot périodique est défini comme étant l'ensemble des MIDND produits dans une même période P par une même installation de traitement thermique de déchet et réceptionné dans une même installation de maturation et d'élaboration des MIDND relevant des rubriques 2716, 2771 ou 2791 de la nomenclature des installations classées.

Si la capacité autorisée de l'installation de traitement thermique productrice du MIDND est supérieure ou égale à 50 000 tonnes de déchets incinérés par an, la période P est de un mois.

Si la capacité autorisée de l'installation de traitement thermique productrice de MIDND est inférieure à 50 000 tonnes de déchets incinérés par an, la période P est de trois mois. Cette période peut être de 6 mois, si l'exploitant de l'installation de traitement thermique productrice du MIDND est en mesure de justifier la conformité de la composition physico-chimique d'au moins 12 lots consécutifs aux critères de recyclage spécifiés à l'annexe I de l'arrêté ministériel.

Les lots périodiques de MIDND qui peuvent être valorisés au sein d'ouvrages routiers sont ceux servant à l'élaboration de graves de mâchefers dont les caractéristiques mécaniques sont conformes aux normes de spécifications d'usage en vigueur concernant les usages routiers visés et dont les caractéristiques environnementales respectent les critères de recyclage définis à l'annexe I de l'arrêté ministériel du 18 novembre 2011.

Les valeurs, associées au lot périodique, représentatives du comportement à la lixiviation et de la teneur intrinsèque en éléments polluants, ne dépassent pas les valeurs limites du tableau ci-dessous :

Eléments chimiques	Valeur limite à respecter	Valeur limite à respecter
	Usage de type 1 (mg/kg de matière sèche)	Usage de type 2 (mg/kg de matière sèche)
As	0.6	0.6
Ba	56	28
Cd	0.05	0.05
Cr Total	2	1
Cu	50	50
Hg	0.01	0.01
Mo	5.6	2.8
Ni	0.5	0.5
Pb	1.6	1
Sb	0.7	0.6
Se	0.1	0.1
Zn	50	50
Fluorure	60	30
Chlorure*	10 000	5000
Sulfate*	10 000	5000
Fraction soluble*	20 000	5000

**Concernant les chlorures, les sulfates et la fraction soluble, il convient, pour être jugé conforme, de respecter soit les valeurs associées aux chlorures et aux sulfates, soit de respecter les valeurs associées à la fraction soluble*

Tableau 2 : Comportement à la lixiviation (NF EN 12457-2) du lot à caractériser: Les valeurs limites à respecter pour les quantités relarguées à un ratio liquide/solide (L/S) =10 l/kg (valeurs issues de l'arrêté ministériel du 18 novembre 2011).

Paramètres	Valeur limite à respecter
COT (carbone organique total)	30 g/kg de matière sèche
BTEX (benzène, toluène, éthylbenzène et xylène)	6 mg/kg de matière sèche
PCB (polychlorobiphényles 7 congénères*)	1 mg/kg de matière sèche
Hydrocarbures (C10 à C40)	500 mg/kg de matière sèche
HAP (Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques)	50 mg/kg de matière sèche
Dioxines et furannes	10 ng I-TEQ** _{OMS, 2005} /kg

*Les 7 congénères : 28, 52, 101, 118, 138, 153 et 180.

**TEQ : Toxic Equivalent Quantity

Tableau 3 : Teneur intrinsèque en éléments polluants sur la base d'une analyse en contenu total du lot à caractériser (valeurs issues de l'arrêté ministériel du 18 novembre 2011).

2. Les critères de recyclage liés à l'environnement immédiat de l'ouvrage routier :

Les conditions d'utilisation des graves de mâchefers doivent respecter des prescriptions particulières d'emploi liées à l'environnement immédiat de l'usage routier. Conformément à l'annexe I de l'arrêté ministériel du 18 novembre 2011, l'utilisation de matériaux routiers doit se faire :

- en dehors des zones inondables et à une distance minimale de 50 cm des plus hautes eaux cinquantennales, ou à défaut des plus hautes eaux connues ;
- à une distance minimale de 30 m de tout cours d'eau, y compris les étangs et les lacs. Cette distance est portée à 60 mètres si l'altitude du lit du cours d'eau est inférieure de plus de 20 mètres à celle de la base de l'ouvrage ;
- en dehors des périmètres de protection rapprochés des captages d'alimentation en eau potable ;
- en dehors des zones répertoriées comme présentant une sensibilité particulière vis-à-vis des milieux aquatiques. Sont notamment concernées :
 - ✓ les zones couvertes par une servitude d'utilité publique instituée, en application de l'article L.211-12 du code de l'environnement, au titre de la protection de la ressource en eau ;
 - ✓ les zones désignées comme zone de protection des habitats des espèces, de la faune et de la flore sauvages en application de l'article L.414-1 du code de l'environnement.
 - ✓ les parcs nationaux
- en dehors des zones de karsts affleurants.

B. Les conditions géotechniques d'utilisation des graves de mâchefers

1. Les caractéristiques géotechniques intrinsèques :

Comme pour les sols, les caractéristiques géotechniques des graves de mâchefers peuvent être décrites par des paramètres de nature, de comportement mécanique et d'état.

Les principaux paramètres de nature sont :

- La masse volumique
- La granularité
- La teneur en fines (passant à 0,08mm) : cette donnée permet d'établir une distinction entre les matériaux pauvres (<12%) ou riches (>12%) en fines
- Le passant à 2mm : ce paramètre permet d'établir une distinction entre les matériaux à tendance graveleuse (passant à 2mm<70%) et sableuse (passant à 2mm>70%)
- La valeur de bleu de méthylène (l'essai n'est pas adapté au mâchefer, la VBS très faible amène à une classification en D selon le GTR et la norme NF P 11-300, ce qui n'est pas correct)
- L'équivalent de sable

Les paramètres de comportement mécanique sont :

- L'essai Los Angeles (LA) est un indicateur de la résistance du matériau à la fragmentation par chocs
- L'essai Micro-Deval (MDE) est un indicateur de résistance à l'attrition d'un matériau

Les paramètres d'état sont :

- La teneur en eau
- La masse volumique apparente sèche
- Les références de compactage à l'Optimum Proctor Normal (OPN) et Modifié (OPM)
- L'indice CBR (immédiat et après immersion)

Le tableau suivant indique les ordres de grandeur des paramètres couramment utilisés pour caractériser les graves de mâchefers :

Les paramètres de nature	
Granularité	0/20 mm à 0/31,5 mm
Teneur en fines (passant à 0,08 mm)	4 à 12%
Passant à 2 mm	20 à 50%
Valeur de bleu de méthylène	0,01 à 0,04 g/100g
Equivalent sable	35 à 55%
Les paramètres de comportement mécanique	
Los Angeles	35 à 50%
Micro-Deval en présence d'eau	15 à 45%
Les paramètres d'état	
Teneur en eau	10 à 20%
Masse volumique apparente sèche (ρ_s)	1 à 1.2t/m ³
Références de compactage à l'Optimum Proctor Normal	Teneur en eau à l'OPN; 15 à 22%
	ρ_{dOPN} : 1,4 à 1,8 t/m ³
	Indice Portant Immédiat (IPI) : 20 à 60
Références de compactage à l'Optimum Proctor Modifié	Teneur en eau à l'OPM : 9 à 17%
	ρ_{dOPM} 1.6 à 1.95 t/m ³
Indice CBR immédiat à l'optimum + 2% à l'OPN	10 à 18
Indice CBR immédiat à l'optimum + 2% à l'OPM	10 à 28
Indice CBR après immersion (4 jours) à l'OPN	22 à 30
Indice CBR après immersion (4 jours) à l'OPM	30 à 110

ρ_d : masse volumique apparente sèche

Tableau 4 : Caractéristiques géotechniques courantes des mâchefers valorisables - d'après le GTIF, SETRA, 1997, Auriol *et al.*, 1999 et François *et al.*, 2000

NB : certains essais géotechniques (valeur de bleu de méthylène, équivalent sable) ne sont pas adaptés à la caractérisation des graves de mâchefers.

Les graves de mâchefers sont généralement considérées comme peu gélives, **il est toutefois recommandé d'étudier la gélivité de la grave de mâchefers concernée avant toute étude de dimensionnement.**

2. La classification géotechnique des graves de mâchefers

La norme NF P 11-300 « Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme » s'applique aux graves de mâchefers. Elles sont classées dans la famille F6 « Mâchefers d'incinération des ordures ménagères » qui est une subdivision de la classe F « Sols organiques et sous-produits industriels ».

Les critères de vérifications retenus par le GTR sont les suivants :

- la perte au feu (ou mesure des imbrûlés) ;
- la fraction soluble ;
- l'efficacité du déferraillage ;
- la qualité du criblage (c'est à dire la granulométrie) ;
- l'homogénéité.

A partir de ces critères, 3 sous-classes de matériaux en découlent :

- F61 : Mâchefers bien incinérés ($PF \leq 5\%$), criblés, déferraillés, dont les teneurs éléments toxiques solubles sont inférieures aux valeurs maximales autorisées par la réglementation en vigueur.
- F62 : Idem F61 mais de fraîche production. Ils doivent donc subir une maturation en IME afin de passer en sous-classe F61.
- F63 : Mâchefers mal incinérés ($PF \geq 5\%$) et dont les teneurs en éléments toxiques solubles sont supérieures aux valeurs maximales autorisées par la réglementation en vigueur. Ces mâchefers ne sont donc pas valorisables en technique routière.

C. Utilisation en remblai

1. Conditions d'emploi :

Les critères du GTR autorisent une réutilisation possible des graves de mâchefers classées F61 en remblai, à l'exception de celles à l'état hydrique th (très humide)

Il faut adapter les conditions d'utilisation à la classe de sol à laquelle elles sont assimilables (B4 à B6). Mais cette assimilation est insuffisante comme le montre l'évolution importante des IPI en présence d'eau.

Après élaboration en IME, les graves de mâchefers ont une teneur en eau importante due au refroidissement en bain siphonné. Leur état hydrique très humide (th) interdit toute utilisation en état (cf. tableau 5). Un séchage au stock est alors préconisé pour diminuer leur teneur en eau.

Classe de grave de mâchefers	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en remblais
F61th	Inutilisable en l'état		
F61h	- Mâchefer sensible aux situations météorologiques. - Faible portance. - Sujet au « matelassage » - Déconseiller en emploi en PST*	+ Pluie faible	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisante
		= Ni pluie, ni évaporation importante	utilisation en état Compactage faible
		- Evaporation importante	Aération pour profiter de la réduction de la teneur en eau Couches minces Compactage moyen
F61m	- Mâchefer sensible aux situations météorologiques. - Bonne caractéristique de portance à court terme - Emploi en PST possible	+ Pluie forte	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisante
		+ + Ni pluie, ni évaporation importante	Utilisation en état Compactage moyen
		- Evaporation importante	Solution 1 : Utilisation en état Compactage moyen
		- Evaporation importante	Solution 2 : Arrosage pour maintien de l'état Compactage moyen
F61s	- Faible teneur en eau d'où nécessité d'un compactage intense - Humidification possible mais difficile à réaliser - Pas retenue comme solution opérationnelle	+ Pluie forte	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisante
		+ + Pluie faible	Couches minces Compactage moyen
		= Ni pluie, ni évaporation importante	Utilisation en l'état Compactage intense
		- Evaporation importante	Arrosage pour maintenir l'état Compactage intense
F61ts	Inutilisable en l'état		

Tableau 5 : Condition de mise en œuvre des graves de mâchefers en remblai par assimilation à un matériau B4 à B6 (selon la norme NF P 11300)

* La partie supérieure des terrassements (PST) correspond sensiblement au mètre supérieur du remblai. En complément des qualités requises pour le corps du remblai, un matériau utilisé en PST doit présenter de bonnes caractéristiques de portance après mise en œuvre. Au même titre que pour les matériaux naturels comparables, la grave de mâchefers F61h ne répond pas à cette exigence, ce qui conduit à déconseiller son emploi en PST.

Les états hydriques peuvent se déterminer ainsi selon le GTIF :

L'état th : $IPI < 10$ ($W > 1.3WOPN$)

L'état h : $1.2WOPN \leq W < 1.3WOPN$ ou $10 \leq IPI \leq 20$

L'état m : $0.8WOPN \leq W < 1.2WOPN$ ou $IPI > 20$

L'état s : $0.6WOPN \leq W < 0.8WOPN$

L'état ts : $W < 0.6WOPN$

Les références WOPN étant difficiles à obtenir, le critère IPI peut devenir prioritaire dans la détermination de l'état hydrique.

2. Action sur la teneur en eau :

Sur une grave de mâchefers d'état hydrique très humide, il est possible de faire baisser la teneur en eau en l'aérant lorsque les conditions météorologiques sont favorables.

Afin de maintenir un état hydrique suffisant, un faible arrosage est préconisé particulièrement lorsque les conditions météorologiques sont évaporantes.

En cas d'humidification plus intense, afin de changer d'état hydrique, un arrosage intensif doit obligatoirement être suivi de phases de malaxage et de délais d'attente, pour que l'eau puisse être correctement absorbée dans les fractions poreuses des graves de mâchefers (cette méthode est réalisable en centrale de traitement mais plus difficilement sur chantier).

Un réglage en couche mince de 20 à 30 cm est recommandé afin d'obtenir une aération ou une humidification homogène de la couche mise en œuvre.

Une préparation à la bonne teneur en eau des graves de mâchefers en centrale peut être envisagée afin d'optimiser l'humidification de ces matériaux extrêmement sensibles à l'eau.

Les graves de mâchefers présentent une porosité importante sur la fraction supérieure à 10mm qui renferme 15% d'eau libre. Cette variation de la teneur en eau devra être prise en compte dans le protocole de définition des teneurs en eau. (Quibel et Evain, 2009).

Enfin, une correction granulaire à l'aide d'un matériau naturel peut être utilisée pour corriger la sensibilité à l'eau (tendance au matelassage). Dans ce cas, les graves de mâchefers doivent être qualifiées de valorisables avant d'effectuer la correction granulaire.

3. Compactage :

Compacteur		Pneus		Vibrants à cylindres lisses								Plaques vibrantes
		P1	P2	V1	V2	V3		V4		V5		PQ4
Energie de compactage faible	Q/S (m)	0.030	0.045	0.020	0.035	0.055		0.075		0.100		0.030
	e (m) compacté	0.20	0.25	0.20	0.25	0.30	0.40	0.30	0.50	0.30	0.60	0.20
	V (km/h)	5.0	5.0	2.0	2.0	3.0	2.0	3.0	2.0	4.0	2.0	1.0
	N	7	6	10	7	6	8	4	7	3	6	7
	Q/L (m ³ /h.m)	150	225	40	70	165	110	225	150	400	200	30
Energie de compactage moyenne	Q/S (m)	0.030	0.040	0.020	0.035	0.050		0.075		0.090		0.025
	e (m) compacté	0.20	0.25	0.20	0.25	0.30	0.35	0.30	0.45	0.30	0.55	0.20
	V (km/h)	5.0	5.0	2.0	2.0	2.5	2.0	3.0	2.0	3.5	2.0	1.0
	N	7	7	10	7	6	7	5	6	3	6	8
	Q/L (m ³ /h.m)	150	200	40	70	125	100	210	140	315	180	25
Energie de compactage intense	Q/S (m)						0.020		0.030		0.035	
	e (m) compacté						0.20		0.30		0.35	
	V (km/h)						2.0		2.0		2.0	
	N						10		10		10	
	Q/L (m ³ /h.m)						40		60		70	

Tableau 6 : Compactage pour une utilisation des graves de mâchefers en remblai

Données issues de l'article du BLPC n°275 - 2009 (p. 5 à 26) A. Quibel et E. Evain « Caractérisation, mise en œuvre et contrôle du compactage des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) dans le domaine des terrassements »

Le maintien de la teneur en eau à l'état moyennement humide (m) par un contrôle de l'état hydrique permettra d'optimiser la densification des graves de mâchefers.

Une grave de mâchefers classée F61m correspondrait à un niveau de difficulté de compactage moyen de type DC2 (indice de concassage moyen), alors qu'une grave de mâchefers classée F61s équivaldrait à un DC3 (indice de concassage élevé).

L'utilisation de compacteur de forte puissance peut entraîner une évolution de la granulométrie des graves de mâchefers.

Le caractère évolutif par fragmentation et attrition a été mis en évidence par des essais de compactage répétés (Quibel et Evain, 2009). Il a été démontré un accroissement de la partie basse des courbes granulométriques de 5% en valeur absolue et des références Proctor de 10% en relatif.

Selon le GTR, la mise en œuvre en remblai doit permettre l'obtention d'une densification de qualité q4 ; ce qui se traduit par un compactage nécessaire pour obtenir des densités moyennes sur toute l'épaisseur de la couche \geq à 95% rdOPN (rdOPN : masse volumique apparente sèche à l'Optimum Proctor Naturel) et des densités en fond de couche \geq 92% rdOPN.

Les importantes dispersions des caractéristiques et des références Proctor sur un stock de graves de mâchefers imposent la réalisation de planches d'essai à chaque début de chantier afin de définir une procédure de compactage adaptée aux graves de mâchefers mises en place.

D. Utilisation en couche de forme

1. Condition d'emploi :

Pour qu'un matériau puisse être utilisé en couche de forme, il est nécessaire qu'il respecte les critères suivants, selon le GTR :

- insensibilité à l'eau
- dimension des plus gros éléments
- résistance mécanique (LA et MDE) pour la tenue du trafic
- comportement au gel

Les graves de mâchefers sont considérées comme peu gélives. Cependant seule une étude particulière pourra l'attester.

Les graves de mâchefers présentent un caractère sensible à l'eau et évolutif qu'il faut prendre en compte lors de la réalisation du chantier.

Le niveau de trafic de la chaussée à construire doit être inférieur ou égal à T4.

2. Dimensionnement :

Classification des graves de mâchefers utilisables en CDF	Classe d'ARASE	N° de la PST	Classe de plate-forme retenue pour le dimensionnement de la chaussée	Épaisseur (m)	Classe de plate-forme retenue pour le dimensionnement de la chaussée	Épaisseur (m)
F61m ou F61 s	AR 1 20 à 50 MPa	N°1	PF2- 50 MPa ≤ EV2 < 80 MPa	0.85	PF2+ 80 MPa ≤ EV2 < 120 MPa	X
		N°2		0.65		0.85
		N°3		0.55		0.65
	AR 2 50 à 120 MPa	N°4		0.45		0.55
		N°5		0*		0.45
		N°6		0*		0*

Tableau 7 : Épaisseur des couches de forme en grave de mâchefers selon le GUTPRA (2005)

*Épaisseur 0 m : hors couche de fin réglage

Tout état hydrique autre que **m (moyennement humide)** et **s (sec)** de la grave de mâchefers ne permet pas d'obtenir la classe de **Plate-Forme immédiate PF2** pour l'épaisseur indiquée. En cas de condition de forte pluie, le chantier doit être arrêté. De même l'humidification est nécessaire en cas de présence de graves de mâchefers F61s lors de conditions météorologiques évaporantes.

3. Compactage :

Matériau	Compacteur	P2		V2	V3	V4		V5		PQ4
	Modalités									
F61m	Q/S (m)	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	0.15
	V (km/h)	5.0		2.0	2.0	2.5	2.0	3.0	2.0	1.0
	N	10		14	10	9	10	7	10	10
	Q/L (m3/h.m)	100		30	50	85	70	135	90	15

Pi : compacteur à pneus

Vi : compacteur vibrant à cylindres lisses

Tableau 8 : Modalités de compactage des couches de forme en grave de mâchefers

Données issues de l'article du BLPC n°275 - 2009 (p. 5 à 26) A. Quibel et E. Evain « Caractérisation, mise en œuvre et contrôle du compactage des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) dans le domaine des terrassements ».

Les rouleaux vibrants à pieds dameurs (VPi), les compacteurs statiques à pieds dameurs (SPi), les plaques vibrantes (PQi) ne conviennent pas pour le compactage des graves de mâchefers F61 en couche de forme.

Les préconisations de compactage liées au respect de l'état hydrique, au niveau de difficulté de compactage et à l'optimisation de la puissance du compacteur utilisé sont les mêmes que pour la mise en œuvre en remblai.

Selon le GTR, la mise en œuvre en couche de forme doit permettre l'obtention d'une densification de qualité q3 ; ce qui se traduit par un compactage nécessaire pour obtenir des densités moyennes sur toute l'épaisseur de la couche \geq à 98.5% rdOPN et des densités en fond de couche \geq 96% rdOPN.

Les importantes dispersions des caractéristiques et des références Proctor sur un stock de graves de mâchefers imposent la réalisation de planches d'essai en chaque début de chantier afin de mettre en place une procédure de compactage propre à chaque type de graves de mâchefers utilisé.

4. Protection :

Afin de pallier aux modifications de l'état hydrique de la surface de la couche et à la circulation sur chantier, une protection sous forme d'un enduit gravillonné, par exemple, devra être réalisée.

5. Graves de mâchefers traitées au liant hydraulique pour une utilisation en couche de forme

Les graves de mâchefers doivent être qualifiées de valorisables avant traitement aux liants hydrauliques.

Il est possible de mettre en œuvre des graves de mâchefers traitées au liant hydraulique en couche de forme. Cette utilisation est alors conditionnée à une étude spécifique précisant notamment la nature du liant et le dosage appliqué. Cette étude est à conduire par l'entreprise utilisatrice conformément aux normes en vigueur et propre à chaque chantier.

Les performances mécaniques des graves de mâchefers traitées sont étudiées selon les mêmes référentiels que pour les matériaux traités traditionnels.

E. Utilisation en assise de chaussée

Selon la norme NF EN 13285 Graves Non Traitées " Spécifications " mai 2004, les graves de mâchefers sont assimilables à :

- une grave GNT de type A
- un granulat de catégorie E
- un sable de type a

Leur emploi doit être limité à la couche de fondation de chaussée dont le trafic doit être inférieur ou égal à T4.

1. Conditions d'emploi

Pour qu'une grave de mâchefers puisse être utilisée en couche d'assise, il est nécessaire qu'elle respecte les critères suivants, selon le GTR :

- insensibilité à l'eau
- dimension des plus gros éléments
- résistance mécanique (LA et MDE) pour la tenue du trafic
- comportement au gel

Elle devra être recouverte par une couche de base en GR classique de roche massive.

Une couverture minimum de 15 cm sera préconisée pour éviter les gonflements dus à l'oxydation des particules d'aluminium résiduelles.

Une étude en laboratoire complétée par des planches expérimentales devra valider la possibilité d'utilisation des graves de mâchefers.

2. Compactage :

Le compactage de la couche d'assise devra suivre un objectif q2 en considérant les références à l'Optimum Proctor Modifié.

Annexes

Annexe 1 : Glossaire

ADEME : Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

GTIF : Guide Technique pour l'utilisation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères d'Ile de France

GTR : Guide Technique de Réutilisation des remblais et des couches de forme – SETRA/LCPC

ICPE : Installations Classées pour la Protection de l'Environnement

IME : Installations de Maturation et d'Elaboration

IPI : Indice de Portance Immédiat

ISDND : Installation de Stockage de Déchet Non Dangereux

L/S : Liquide/Solide

LOS : Essai Los Angeles

pd : masse volumique apparente sèche

MDE : Essai micro-Deval

MIDND : Mâchefers d'Incinération de Déchets Non-Dangereux, anciennement dénommés MIOM

OPN : Optimum Proctor Normal

OPM : Optimum Proctor Modifié

Overband : exemple d'unités électromagnétiques ou munis d'aimants

PF : Perte au Feu

SETRA : Service d'Etude sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements

UIDND : Usine d'Incinération de Déchets Non-Dangereux, anciennement dénommée UIOM

VBS : Essai de valeur au bleu de méthylène

As : arsenic

Ba : baryum

Cd : cadmium

Cr total : chrome total

Cu : cuivre

Hg : mercure

Mo : molybdène

Ni : nickel

Pb : plomb

Sb : antimoine

Se : sélénium

Zn : zinc

COT : carbone organique total

BTEX : benzène, toluène, éthylbenzène et xylène

PCB : polychlorobiphényl

HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques

TEQ : Toxic Equivalent Quantity

Annexe 2 : Bibliographie

Le cadre réglementaire spécifique à l'incinération des déchets est défini par :

1. La Directive européenne 2000/76/CE du 4 décembre 2000 relative à l'incinération des déchets.
2. L'arrêté du 20 septembre 2002 relatif aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets dangereux et de co-incinération de déchets non dangereux et aux installations incinérant des déchets d'activité de soins à risques infectieux.
3. L'arrêté du 03 Août 2010 qui modifie l'arrêté du 20/09/02 relatif aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets dangereux et de co-incinération de déchets non dangereux et aux installations incinérant des déchets d'activité de soins à risques infectieux.
4. La circulaire n° 94-35 du 01/03/94 relative aux déchets industriels assimilables aux déchets ménagers et plans départementaux d'élimination.

L'élaboration des graves de mâchefers :

5. ADEME (2002), Plateformes de traitement et de maturation des mâchefers, bilan de 32 opérations françaises aidées par l'ADEME, Publication n° 4453.
6. Le syndicat national du traitement et de la valorisation des déchets urbains et assimilés (SVDU), (1995), Guide méthodologique pour l'échantillonnage des MIOM, en flux ou en tas.
7. Protocole technique pour la détermination du potentiel polluant des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (2000).
8. Julien Bertholon, Roger Duval (Professeur des Universités), les déchets solides de l'incinération des ordures ménagères. Mémoire de Maîtrise en sciences de l'environnement, milieux urbains et industriels, Université de Cergy-Pontoise, 2002.
9. ADEME, TEQ : "Toxic Equivalent Quantity", 18/12/2005.

Le cadre réglementaire spécifique au recyclage des MIDND est défini par :

10. L'arrêté ministériel du 18 novembre 2011 relatif au recyclage en technique routière des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux.

L'emploi des graves de mâchefers repose sur divers documents techniques et guides :

11. Guide Technique pour la Réalisation des remblais et des couches de forme du SETRA, 1992 (GTR).
12. Guide méthodologique pour l'échantillonnage des mâchefers d'usine d'incinération d'ordures ménagères à la production sur flux (SVDU, Juin 1995).
13. Guide méthodologique pour l'échantillonnage des mâchefers d'usine d'incinération d'ordures ménagères après maturation (SVDU, Mai 1996).
14. Note d'information CD 103 sur l'utilisation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères en technique routière (SETRA, Août 1997).
15. Guide Technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-de-France (GTIF) – Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (Préfecture d'Ile-de-France, Conseil Régional d'Ile-de-France, UNICEM, SPRIR Ile-de-France, Contrat de Plan interrégional du Bassin parisien, SYCTOM, SVDU, Novembre 1998).
16. Guide d'Utilisation en Travaux Publics Rhône Alpes (GUTPRA) – Graves de recyclage – graves recyclées de démolition et de mâchefer (Conseil Régional du Rhône,

Communauté urbaine du Grand Lyon, FRTP Rhône-Alpes, UNICEM Rhône-Alpes et SPRIR Rhône-Alpes, 2005).

17. Guide « Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière : évaluation environnementale », SETRA, Mars 2011.
18. Caractérisation, mise en œuvre et contrôle du compactage des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) dans le domaine des terrassements, Quibel et Evain, BLPC n°275 avril, mai et juin 2009.
19. Le site internet OFRIR : <http://ofrir.ifsttar.fr>

Annexe 3 Liste de références

Département	Site	Entreprise	Maître d'ouvrage	Maitre d'œuvre	Année	Tonnage grave de mâchefers valorisables	Nature des travaux
21	ZAC Valmy	SNEL	SEMAAD	Cabinet Merlin	2007	2500 t	Remblai sous voiries (trafic T4)
21	Piscine olympique	Roger Martin	Grand Dijon	AERIA	2009	20000 t	Remblai et couche de forme sous voiries Parking VL
21	Route de Côte d'Or	Roger Martin	CG 21	JAPCA	2004	8000 t	Remblai (trafic T4)
58	Loire matériel Cosne sur Loire	Merlot TP	SCI EMI	-	2008	2000 t	Couche de forme sous parking VL
58	Parigny les Vaux	Merlot TP	Commune de Parigny	Safege	1500 t en 2009 et 1500 t en 2011	3000 t	Remblai de tranchée

Annexe 4 : Caractérisations géotechniques des graves de mâchefers élaborées en région Bourgogne :

La figure ci-dessous présente un exemple de fuseau granulométrique de graves de mâchefers élaborées en Bourgogne.

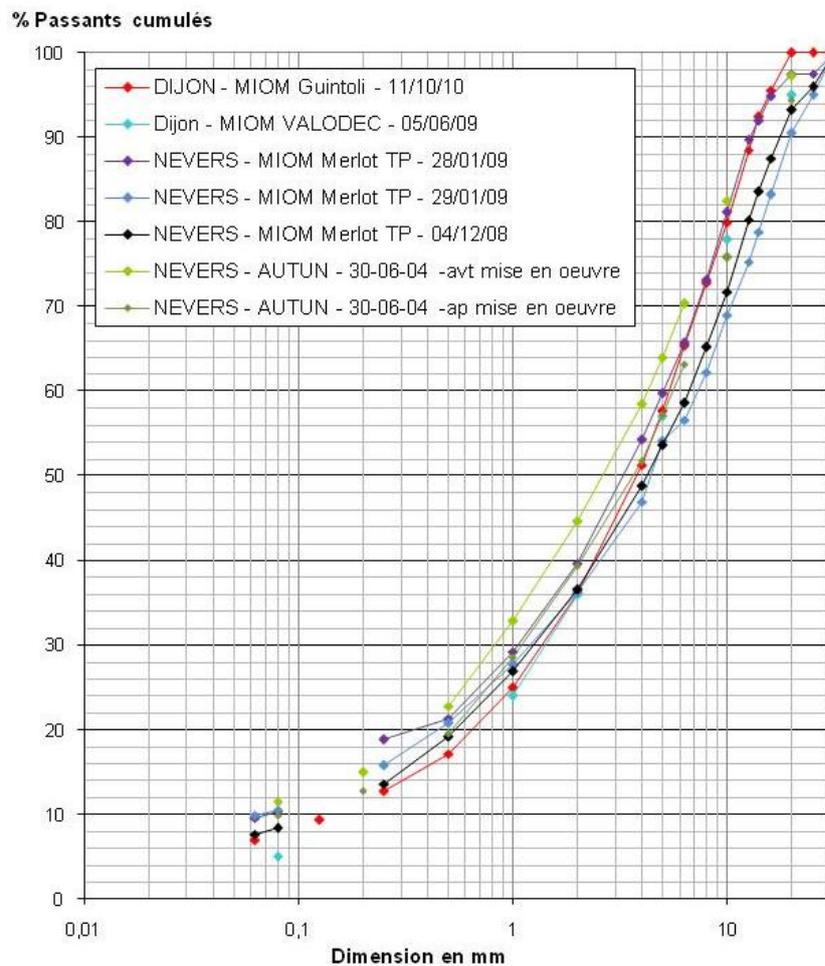


Figure 2 : Caractérisation géotechnique

Provenance		Graves de mâchefers Dijon			Graves de mâchefers de Nevers					Caractéristiques moyennes que l'on peut retrouver dans la littérature telle que le Guide Technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile de France, SETRA 1997, Auriol et al., 1999 et François et al., 2000		
Essais réalisés par :		Guintoli	Guintoli	GINGER CEBTP (VALODEC)	Merlot TP	Merlot TP	Merlot TP	AUTUN				
date	Normes	11/10/2010	21/10/2010	05/06/2009	28/01/2009	29/01/2009	04/12/2008	30/04/2004				
								avant mise en œuvre	Après mise en œuvre			
Analyse granulométrique par tamisage	NF EN 933-1 ou NF P 94-056	0/D	NF EN 933-1		NF P 94-056	NF EN 933-1	NF EN 933-2	NF EN 933-3	NF P 94-056	NF P 94-056		
		31,5	100		100	100	100	100	100	100		
		25	100			97,52	95,03	96,06				
		20	100		95	97,52	90,57	93,32	97,3	94,5		
		16	95,6			94,93	83,27	87,55				
		14	92,5			91,99	78,86	83,61				
		12,5	88,5			89,69	75,34	80,31				
		10	80		78	81,22	69,02	71,79	82,5	75,9		
		8	72,8			73,16	62,28	65,2				
		6,3	65,4	100		65,72	56,64	58,61	70,4	63,2		
		5	57,7			57	59,79	54,14	53,66	64	57,3	
		4	51,3				54,26	46,95	48,81	58,5	51,7	
		2	36,1			36	39,74	36,28	36,63	44,6	39,3	20 à 50%
		1	25			24	29,26	27,73	26,92	32,9	28,6	
		0,5	17,2				21,37	20,79	19,23	22,8	19,5	
		0,25	12,7				18,89	15,81	13,64			
0,2								15	12,7			
0,125	9,4											
0,08		8,7	5	10,36	10,58	8,42	11,5	9,9	4 à 12%			
0,063	6,9				9,61	9,91	7,69					
Teneur en eau naturelle	NF P 94-050	27,2	27	15,2	28	26,5		20,4	21,4	10 à 30%		
Equivalent de sable	NF EN 933-8									>30		
LOS ANGELES	P 18-573			44						35 – 50		
MICRO-DEVAL	P 18-572			27						15 – 45		
rdOPN	Optimum Proctor NORMAL - NF P 94-093		1,66	1,51						1,4 – 1,8 t/m3		
WOPN			17,6	20,5						15 – 22%		
Indice Portant Immédiat (OPN)	NF P 94-078			53						30 – 80		
rdOPM	Optimum Proctor MODIFIE - NF P 94-094									1,6 – 1,95 t/m3		
WOPM										9 – 17%		
Indice Portant Immédiat (IPI)	NF P 94-078									70 – 90		
Classification GTR	NF P 11-300	F61 assimilé D21	F61 assimilé D21	F61 assimilé D21	F61 assimilé D21	F61 assimilé D21	F61 assimilé D21	F61 assimilé D21	F61 assimilé D21	F6		

Tableau 9 : Identifications géotechniques - comparaison et généralités