

## Mâchefers d'incinération de Déchets Non Dangereux

**Mise à jour de la version : 19/12/2014**

1.	Définition .....	1
2.	Textes spécifiques de référence .....	2
3.	Origine, formation et élaboration.....	4
4.	Caractéristiques physico-chimiques.....	8
5.	Caractéristiques géotechniques.....	13
6.	Caractéristiques environnementales.....	16
7.	Aspects sanitaires.....	24
8.	Utilisation dans les infrastructures routières.....	24
9.	Références bibliographique .....	26
10.	Auteurs et relecteurs .....	31

### **1. Définition**

Les Mâchefers d'Incinération de déchets non dangereux (MIDND) sont les résidus solides issus de la combustion dans des fours d'usine d'incinération (fours à grilles, à rouleaux ou oscillants) de la fraction non triée des ordures ménagères, collectée par le service public, et généralement plus ou moins mélangée à des déchets d'entreprises (artisans, commerçants) et administrations. Ils sont définis dans [l'arrêté du 18/11/2011](#) comme étant des déchets provenant de l'extraction des matières solides en sortie du four des installations de traitement thermique de déchets non dangereux relevant de la rubrique 2771 de la nomenclature des installations classées ou des installations de traitement thermique de déchets non dangereux et des déchets d'activités de soins à risques infectieux (DASRI) relevant des rubrique 2770 et 2771 de la nomenclature des installations classées si les DASRI et les déchets non dangereux sont incinérés en mélange et si la quantité de DASRI est inférieure ou égale à 10 % de la quantité des déchets incinérés.

Depuis l'arrêté du [25 janvier 1991](#), relatif aux installations d'incinération de résidus urbains (Art. 14), le terme de MIOM s'applique uniquement aux « scories récupérées en fin de combustion ». Cet arrêté stipule que les « cendres volantes » entraînées par les gaz de combustion (captées par le système de dépoussiérage) et les « résidus de déchloruration et de lavage des fumées » doivent en être séparés. Ils sont englobés sous le terme de « résidus d'épuration des fumées d'incinération d'ordures ménagères » (REFIOM).

Dans le cadre de [l'arrêté du 18/11/2011](#), il est précisé à l'article 2 de nouvelles définitions relatives à la préparation des mâchefers sur l'installation de maturation et d'élaboration :

- Le lot périodique : ensemble de mâchefers d'incinération de déchets non dangereux (MIDND) produit dans une période P par une même installation de traitement thermique de déchets non dangereux et réceptionné dans une même installation de maturation et d'élaboration des MIDND relevant des rubriques 2716 (Installations de transit, regroupement ou tri de déchets non dangereux non inertes), 2771 (Installations de traitement thermique de déchets non dangereux) ou 2791 (Installations de traitement de déchets non dangereux) de la nomenclature des installations classées.
- L'élaboration : opération reposant sur une combinaison de traitements physiques simples, dits de préparation, et de traitements physico-chimiques simples, dits de maturation, visant à produire un matériau alternatif à partir d'un MIDND.
- La formulation : opération visant à mélanger des matériaux, alternatifs ou non, dans des proportions déterminées afin de produire un matériau routier.

## 2. Textes spécifiques de référence

Les différents textes faisant référence aux MIDND et installations classées associées sont listés ci-après.

### 2.1. - Documents réglementaires

- [Arrêté ministériel du 25 Janvier 1991](#), relatif aux installations d'incinération de résidus urbains.
- [Arrêté ministériel du 20 Septembre 2002](#), relatif aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets non dangereux et aux installations incinérant des déchets d'activités de soins à risques infectieux.
- [Arrêté du 18 novembre 2011](#) relatif au recyclage en technique routière des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux

Déchet	Code nomenclature	Réglementation applicable
Mâchefers, scories et cendres sous chaudière (sauf cendres sous chaudière visées à la rubrique 10 01 04) provenant de centrales électriques et des autres installations de combustion	10 01 01 (déchets non dangereux)	Soumis à la réglementation générale en matière de déchets non dangereux
Mâchefers, scories et cendres sous chaudière provenant de la co-incinération contenant des substances dangereuses provenant de centrales électriques et des autres installations de combustion	10 01 14* (déchets dangereux)	Soumis à la réglementation générale en matière de déchets dangereux
Mâchefers, scories et cendres sous chaudière provenant de la co-incinération autres que ceux visés à la rubrique 10 01 14 provenant de centrales électriques et des autres installations de combustion	10 01 15 (déchets non dangereux)	Soumis à la réglementation générale en matière de déchets non dangereux
Mâchefers provenant de déchets de déferrailage	19 01 02 (déchets non dangereux)	
Mâchefers contenant des substances dangereuses issus des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine	19 01 11* (déchets dangereux)	Soumis à la réglementation générale en matière de déchets dangereux
Mâchefers issus des installations de gestion des déchets, des stations d'épuration des eaux usées hors site et de la préparation d'eau destinée à la consommation humaine autres que ceux visés à la rubrique 19 01 11	19 01 12 (déchets non dangereux)	Soumis à la réglementation générale en matière de déchets non dangereux

**Tab. 1** : Classification des MIDND – Décret n° 2002-540 du 18/04/02 codifié par les articles R541-7 à R541-11 du Code de l'Environnement relatif à la classification des déchets

## 2.2. - Documents techniques

- Guide méthodologique pour l'échantillonnage des mâchefers d'usine d'incinération d'ordures ménagères à la production sur flux (Syndicat national du traitement et de la Valorisation des Déchets Urbains et industriels - SVDU, Juin 1995).
- Guide méthodologique pour l'échantillonnage des mâchefers d'usine d'incinération d'ordures ménagères après maturation [SVDU, Mai 1996].
- [Note d'information CD 103](#) sur l'utilisation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères en technique routière [SETRA, Août 1997].
- Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-de-France – 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].
- Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière, Évaluation environnementale, Sétra 2011 [référence Sétra : 1101]

- [Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière, Les mâchefers d'incinération de déchets non dangereux \(MIDND\), Sétra 2012 \[référence Sétra : 1221\]](#)

### 2.3. – Documents administratifs

- Circulaire du 1<sup>er</sup> Mars 1994 du ministère de l'Environnement, relative aux déchets industriels assimilables aux déchets ménagers et plans départementaux d'élimination.
- [Circulaire du 9 Mai 1994](#) du ministère de l'Environnement, relative à l'élimination des mâchefers d'incinération des résidus urbains.

## 3. Origine, formation et élaboration

### 3.1.- Matière première

La matière première des MIDND est multiple et variable (en particulier dans l'espace : zones urbaines, zones rurales, zones côtières, influence du tri). Les MIDND sont issus de l'incinération de la fraction des ordures ménagères collectée en mélange et de celle des déchets dits « assimilés » aux déchets ménagers et provenant des commerces, des industries et administrations [cf. Décret 2002-540 relatif à la classification des déchets - Chapitre 20 – Annexe II]. L'incinération des déchets ménagers et assimilés divise par 3 leur masse, et par 10 leur volume.

La définition des **ordures ménagères** au sens strict correspond aux déchets des ménages (environ 20 millions de tonnes/an) à l'exclusion des encombrants (environ 4,5 millions de tonnes/an) [IFEN, 1999]. Ces ordures ménagères se composent de déchets putrescibles, papiers et cartons, textiles, plastiques, verre, métaux, matériaux complexes, déchets dangereux [cf. Décret 2002-540 - Chapitre 20 - Annexe II]. La fraction des ordures ménagères collectée sélectivement est orientée vers des filières de valorisation « matière ».

Concernant les **déchets industriels et commerciaux** collectés avec les déchets des ménages, la circulaire du ministère de l'Environnement du 28 Avril 1998, indique qu'« il faut considérer, pour la collecte, que les déchets « assimilés » aux déchets ménagers sont les déchets courants des petits commerces, des artisans, des services, qui sont présentés sur le trottoir dans les mêmes récipients que les ordures ménagères, et qu'il est bien souvent impossible de distinguer, lors de la collecte, des déchets ménagers ». Ces déchets sont évalués à environ 5 millions de tonnes annuellement.

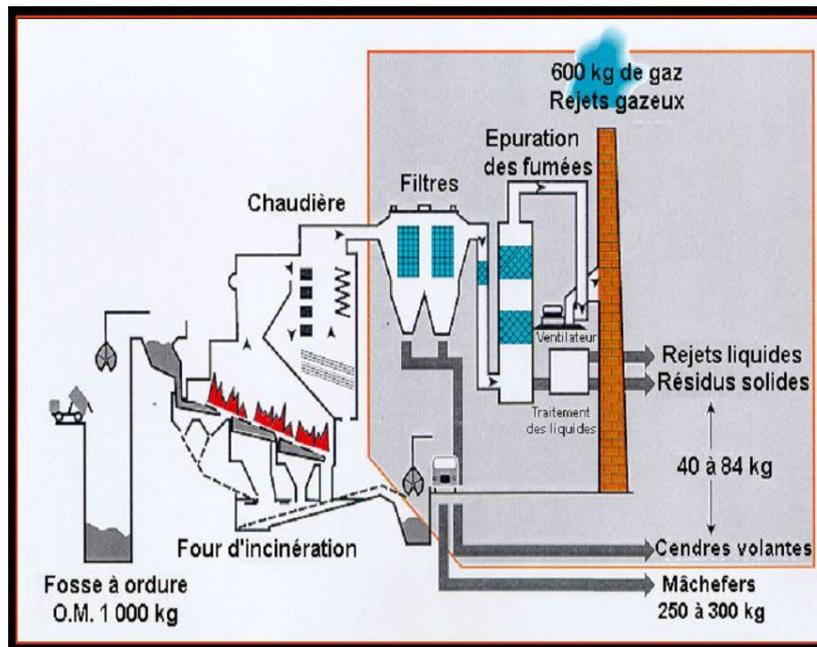
Enfin, certaines usines, moins nombreuses, peuvent réaliser la co-incinération de boues d'épuration urbaines, et de Déchets d'Activités de Soins à risques infectieux (DASRI).

### 3.2. – Processus de fabrication

Une usine d'incinération d'ordures ménagères se compose :

- d'une fosse de réception des déchets;
- d'un groupe four-chaudière (récupération de vapeur pour la valorisation énergétique des déchets sous forme de chaleur et/ou d'électricité);
- d'une unité de traitement des fumées;
- d'une unité d'entreposage des REFIOM (déchets dangereux) avant évacuation;

- d'une unité d'entreposage des MIDND (déchets non dangereux) avant évacuation.



**Figure 1** : Schéma d'une usine type

Les conditions d'incinération sont fixées par [l'arrêté ministériel du 25 janvier 1991](#). D'après cet arrêté, « les gaz provenant de la combustion des déchets doivent être portés même dans les conditions les plus défavorables, après la dernière injection d'air de combustion, d'une façon contrôlée et homogène à une température d'au moins 850°C pendant au moins deux secondes en présence d'au moins 6% d'oxygène mesuré dans les conditions réelles ».

La température au cœur du foyer est donc supérieure à 850°C sans qu'il soit possible de la connaître directement (l'étude minéralogique des MIDND permet d'y accéder). Elle varie selon le fonctionnement du four : sa charge et le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) des ordures.

L'opérateur chargé de l'alimentation de la trémie de chargement du four mélange préalablement les déchets dans la fosse de réception à l'aide du grappin pour assurer la régularité du fonctionnement du four (contrôle du PCI des déchets). Un crible à l'entrée de la trémie retient les éventuels monstres.

Avant l'incinération proprement dite, dans la partie amont du four, les déchets subissent une phase de séchage. Ensuite, sous l'effet de l'air insufflé dans le four, la combustion est initiée. Les fours fonctionnent en auto-combustion. L'avancée et le brassage des déchets sont produits par le mouvement des grilles, la rotation des rouleaux ou du four oscillant. La zone de post-combustion, en aval de l'arrivée d'air primaire, permet de parfaire la combustion. La sortie des mâchefers du four se fait en règle générale à travers un bac à eau permettant leur refroidissement rapide ainsi que la fermeture du four. Il existe des dispositifs d'extraction à sec, moins répandus. Dans ceux-ci, les MIDND peuvent ensuite être refroidis par aspersion, ce qui permet de rabattre les poussières. A ce stade, on parlera de « MIDND bruts ».

### 3.3. – Préparation éventuelle

Dès la sortie du four et avant leur sortie du site de l'usine d'incinération, les MIDND bruts peuvent subir un certain nombre d'opérations d'homogénéisation. Ces opérations seront plus poussées par la suite dans des Installations de Maturation et d'Elaboration (IME) pour améliorer l'ensemble de leurs caractéristiques (cf. § Préparation à l'emploi en IME).

### 3.3.1 Opérations en sortie de four

Les opérations pouvant être réalisées sur les MIDND dès leur sortie de four sont les suivantes :

- le criblage, permettant de débarrasser les MIDND des déchets les plus volumineux, notamment des déchets métalliques, et de briser d'éventuels blocs MIDND-déchets métalliques creux;
- le retrait des métaux ferreux par over-band ;
- le retrait des métaux non-ferreux par machine à courant de Foucault.

Les métaux séparés sont dirigés vers des filières de valorisation « matière », quel que soit le devenir envisagé pour les MIDND. Ces derniers peuvent être entreposés momentanément avant leur envoi vers une IME ou un centre de stockage de déchets non dangereux (ou ISDND).

### 3.3.2 Préparation à l'emploi en IME

Dans son chapitre II (Conditions de valorisation), la circulaire de 1994 considérait qu'il est « très souhaitable de déferrailler au préalable (les mâchefers de catégorie « V ») pour s'assurer de l'absence d'imbrûlés de grande taille ou d'objets indésirables ». Les opérations d'homogénéisation et de criblage réalisées sur les IME sont en effet plus poussées que celles réalisées en sortie de four. Toutefois, elles ne se limitent pas forcément au criblage et au déferailage. De même, [l'arrêté du 18/11/2011](#) indique que « la phase d'élaboration au sein de l'IME comprend a minima un tri permettant d'extraire les matières indésirables dans le matériau routier, en particulier les métaux et les imbrûlés de grande taille ».

Pour être homogène du point de vue terminologique, on dira que les matériaux issus d'une IME sont des « MIDND élaborés ». Les IME sont en général règlementées au titre des rubriques 2716 et/ou 2771 de la nomenclature des installations classées, ou par connexité notamment lorsqu'elles sont situées sur le site de l'incinérateur.

#### - **Les catégories de MIDND**

Au sein d'une IME, après maturation, les MIDND élaborés doivent vérifier les critères de recyclage liés notamment à leur usage routier, à leur comportement à la lixiviation et à leur teneur intrinsèque en éléments polluants. Les résultats des essais de lixiviation et d'analyse du contenu total doivent être conformes aux paramètres et seuils introduits par [l'arrêté du 18/11/2011](#). Les MIDND élaborés doivent remplir au minimum les conditions des usages routiers de type 1 ou 2 définis par l'arrêté du 18/11/2011. L'appartenance des MIDND élaborés à ces types d'usage est déterminée par des analyses périodiques au stade de leur production. Les MIDND élaborés ne répondant pas aux seuils de ces usages routiers de type 1 ou 2 doivent rejoindre directement une installation de stockage de déchets non dangereux, dite ISDND. [L'arrêté du 18/11/2011](#)

fixe la durée de stockage en IME à trois ans maximum.. Passé ce délai, les lots de MIDND élaborés doivent être évacués vers une ISDND.

#### - **Le processus physico-chimique de maturation**

Diverses études ont permis de mieux comprendre le processus physico-chimique appelé « maturation » [IAWG, 1997 ; Amokrane et al., 1998 ; Freyssinet et al., 1998 ; Bodénan et al., 2000 ; Fléhoc et al., 2000 ; Bodénan et al., 2001].

Outre le phénomène de lessivage des chlorures, consécutif à la dissolution des sels (NaCl, KCl), la dissolution de la portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) créée lors de la trempe des MIDND en sortie de four, est une de principales réactions identifiées dans le processus de maturation. L'hydratation de la chaux (CaO) lors de la trempe est fortement exothermique (500 joules par kg de chaux hydrolysée). La dissolution de la portlandite libère du calcium et des ions  $\text{OH}^-$  conduisant à des pH très alcalins ( $> 12$ ). Le pH alcalin favorise la diffusion du  $\text{CO}_2$  atmosphérique dans l'eau d'hydratation des MIDND sous forme  $\text{CO}_3^{2-}$ , ce qui entraîne la précipitation de carbonates et notamment de la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ). La dissolution de  $\text{CO}_2$  dans l'eau se traduit par une neutralisation progressive des ions  $\text{OH}^-$ . La baisse de pH induite par la carbonatation, et la diminution des quantités de Ca libéré par la portlandite, favorise la solubilisation du gypse ( $\text{CaSO}_4$ ), et le lessivage des sulfates. La baisse du pH conduit à la diminution de la solubilité d'un certain nombre de métaux amphotères (notamment Pb et Cr) qui précipitent sous forme d'hydroxydes. Des métaux (Pb, Zn) peuvent aussi se trouver inclus dans la calcite néoformée.

#### - **Opérations d'homogénéisation**

Les opérations visant à améliorer l'homogénéité et la qualité des MIDND en vue de leur utilisation en technique routière sont :

- le criblage ou scalpage, éventuellement complété par un concassage, en vue de faire rentrer le matériau dans un fuseau granulométrique de GNT ;
- le retrait des métaux ferreux par over-band ;
- le retrait des métaux non-ferreux par machine à courant de Foucault ;
- le retrait des imbrûlés résiduels par soufflage (papiers, cartons et plastiques).

Ces opérations peuvent être réalisées une ou plusieurs fois pour améliorer le résultat final et être conduites sur différentes fractions granulométriques des MIDND. Les matériaux extraits rejoignent des filières de valorisation matière.

#### - **Les traitements éventuels des MIDND par ajout de liants**

[L'arrêté du 18/11/2011](#) prévoit des traitements appropriés, notamment à l'aide de liants hydrauliques, sous réserve que la grave de mâchefer fasse l'objet d'une caractérisation environnementale et que le mélange fasse l'objet d'études de traitement pour notamment vérifier ses performances mécaniques.

Aujourd'hui, différentes entreprises routières et de recyclage, proposent de manière courante des mâchefers traités aux liants hydrauliques ou hydrocarbonés pour application en construction routière. Chacune propose un produit qui est un mélange entre un liant spécifiquement développé et les MIDND élaborés. Les détails des procédés de traitement relèvent de la confidentialité industrielle. Certains ont fait l'objet de brevets consultables auprès de l'Institut National de la Propriété Industrielle.

Jusqu'à maintenant, peu de résultats scientifiques ont été diffusés au sujet de la compatibilité et des interactions physico-chimiques entre les mâchefers (en prenant en

compte leur variabilité propre) et les différents liants utilisables, pour qu'il soit possible d'apporter une réponse à la question du bénéfice global du traitement et de ses effets dans le temps, du point de vue mécanique (stabilité dimensionnelle, performance), et environnemental (durabilité de la stabilisation). Compte tenu de la complexité de la physico-chimie des MIDND et de leur diversité à l'échelle nationale, on ne peut aujourd'hui donner de règle universelle en matière de traitement aux liants pour ce matériau.

Le guide du SETRA d'octobre 2012 précise que les matériaux routiers traités aux liants hydrauliques utilisant de la grave de mâchefer « bénéficient d'une large expérience depuis une vingtaine d'années ». Ainsi, les mâchefers élaborés entrant dans la composition de la grave de mâchefer traitée, doivent respecter les valeurs limites environnementales de l'annexe 1 du guide de 2012. Par contre, il n'y a pas besoin de vérifier que la grave de mâchefer traitée respecte ces valeurs limites s'il s'agit d'un traitement avec un liant hydraulique routier ou hydrocarboné. Dans le cas contraire, le matériau traité doit faire l'objet d'une évaluation environnementale conforme au guide général du SETRA sur l'acceptabilité des matériaux alternatifs de 2011. Enfin, le guide Sétra de 2012 spécifique aux MIDND, présente en annexe deux fiches d'emploi concernant les couches de forme et d'assis utilisant des graves de mâchefer traitées aux liants hydrauliques pour améliorer les performances mécaniques du matériau.

## 4. Caractéristiques physico-chimiques

### 4.1. – Composition élémentaire

La composition élémentaire des MIDND bruts dépend de la composition des ordures incinérées, de la volatilité des éléments, du processus d'incinération (type de four, conduite du four). Elle peut donc varier dans le temps pour un site de production donné, et dans l'espace, d'un site de production à un autre. La composition d'un lot de MIDND évoluera aussi en fonction de l'efficacité des opérations de retrait des métaux et des imbrûlés. Un même MIDND selon qu'il sera brut ou qu'il aura été plus ou moins élaboré aura donc une composition élémentaire et des caractéristiques physico-chimiques différentes. Force est de constater que nombre d'études dans ce domaine omettent de préciser le degré de préparation des matériaux.

### 4.2. – Composés organiques

La persistance de matière organique dans les mâchefers est liée à la nature des déchets introduits dans le four et aux conditions de fonctionnement du four (température, brassage, temps de séjour, aération). On observe ainsi souvent des imbrûlés dans les MIDND : papiers, cartons, coton, fibres synthétiques, os, pelures de fruits, des matières plastiques, du caoutchouc. Cette matière organique représente 0,5 à 5,5 % (exprimée en Carbone Organique Total) et 1 à 6 % (exprimée en imbrûlés), de la masse sèche des MIOM, la solubilité du COT à l'issue de l'essai de lixiviation des MIDND s'étalant de 250 à 2000 mg/kg de matière sèche [[Pépin et al., 2001](#)]. La circulaire du 9 Mai 1994 demandait un taux d'imbrûlé inférieur à 5% pour les MIOM V et M et respectivement des seuils à 1500 mg/kg et 2000 mg/kg pour le COT. Le guide du Sétra d'octobre 2012 précise que le taux d'imbrûlé est contrôlé par la mesure du COT ou la perte au feu [cf. arrêté ministériel du 20/09/2002 modifié].

La matière organique dans les MIDND [Pépin et al., 2001] est composée majoritairement de cellulose (74 %), puis de lignine (20 %), le reste (6%), étant composé essentiellement (à 95 %) de substances extractibles à l'eau (substances humiques, acides carboxyliques, composés hydroxylés). Enfin, les substances extractibles par solvants organiques (soit 0,3 % du total) sont des alcanes, des stéroïdes (biodégradables), des acides gras saturés et des polluants plus persistants tels des phtalates, mais aussi des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et des composés organochlorés : polychlorodibenzodioxines (PCDD – dites « dioxines »), polychlorodibenzofuranes (PCDF – dites « furanes »), chlorophénols (CP), chlorobenzènes (CB) et polychlorures biphényles (PCB). Les études relatives aux polluants organiques des mâchefers sont encore peu nombreuses. Des études sur l'impact des dioxines sur l'environnement ont été réalisées en France à l'INERIS notamment (voir chapitre « Caractéristiques environnementales »).

L'IAWG a réalisé en 1997 une compilation des données disponibles sur les mâchefers au niveau international. Le tableau 2 indique, en nanogramme/gramme (nano =  $10^{-9}$ ), les concentrations en dioxines, furanes, chlorophénols (CP), chlorobenzène (CB), HAP et PCB, répertoriées alors. Pour l'heure, l'extrême rareté des données en la matière (9 usines, 3 pays) fait de ces dernières des valeurs de référence.

Pays	Unité	Dioxines	Furanes	CP	CB	HAP	PCB
Canada	GVRD	.nd	.nd	9,0	.nd	181	.nd
	PEI	.nd	.nd	.nd	20	1 800	.nd
	LVH	.nd	.nd	34,1	6,7	2 190	.nd
	SWARU	0,4	< 0,2	164	4,0	19 900	.nd
	QUC	.nd	.nd	14 - 48	6,0 - 13,5	125 - 968	.nd
Allemagne	A	0,036 - 0,039	0,096 - 0,102	-	-	-	-
	B	0,041 - 0,048	0,091 - 0,094	-	-	-	-
	C	0,025 - 0,029	0,054 - 0,068	-	-	-	-
Etats-Unis	Mid-Conn	0,04 - 0,31	0,10 - 0,50	4 - 5	.nd	13 - 29	.nd

nd = non détecté

CP : chlorophénols

CB : chlorobenzènes

HAP : hydrocarbures aromatiques polycycliques

PCB : polychlorures biphényles

**Tab. 2 :** Composés organiques observés (en ng/g) – d'après IAWG, 1997

Dans les fours des usines d'incinération, les dioxines et furanes sont généralement détectés au niveau des poussières car ils s'adsorbent sur les particules charbonneuses entraînées dans les fumées. Ils peuvent par conséquent être captés au niveau des dispositifs de traitement des fumées, en particulier au moyen de charbons actifs. Depuis 1991, on doit donc les retrouver principalement dans les REFIOM.

Des analyses réalisées en France sur des MIDND issus d'usines d'incinération de conception récente [Bartet et al., 2001], dont l'âge et le degré de préparation [cf. § Préparation éventuelle] ne sont toutefois pas précisés, révèlent en effet des teneurs faibles à très faibles par rapport à celles des cendres sous chaudière (39 à 648 ng I-TEQ/kg), des cendres volantes (765 à 4815 ng I-TEQ/kg) et des gâteaux de filtration

(30000 ng I-TEQ/kg). Les mesures de dioxines dans ces MIDND sont présentées dans le tableau suivant, en ng I-TEQ/kg de matière sèche. A titre de comparaison, les références françaises étant rares en la matière, les auteurs donnent des concentrations pour des MIDND (tab 3) (non mélangés aux résidus de traitement des fumées) produits au Japon : les valeurs moyennes et maximum sont très inférieures en France. Les teneurs en dioxines mesurées en France sont aussi inférieures à celles mentionnées au Canada, en Allemagne et aux Etats-Unis (voir tableau précédent). Une étude plus récente sur des MIDND utilisés en construction routière [Badreddine et al, 2003] d'une part confirme les valeurs faibles dans des matériaux récents (post-arrêté de 1991) et d'autre part montre des teneurs variables mais plus élevées dans des matériaux anciens (pré-1991). Par ailleurs, en l'absence d'information sur les techniques et les réglementations nationales portant sur la séparation MIDND/REFIOM, les données étrangères ne sont pas toutes directement comparables aux données Françaises.

Pays (année étude)	France (1997)	France (2000)	Japon (2000)	France (2003)	
Année de production	-	-	-	Pré 1991	Post 1991
Nombre d'échantillons	5	5	39	7	2
Valeur minimum	4,0	4,6	0,7	14	9
Valeur maximum	20,6	11,3	1 500	721	9
Valeur moyenne	9,2	7,6	200	-	-

**Tab. 3** : Dioxines dans les MIDND (en ng I-TEQ/kg MS) – d'après Bartet et al, 2001 et Badreddine et al, 2003

A titre de comparaison, à partir de données publiées aux Etats-Unis par l'agence de l'environnement (*Exposure and Human Health Reassessment of 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-Dioxin (TCDD) and Related Compounds* – EPA/600/P-00/001Ab) en Mars 2000, Bartet et al. [2001], indiquent pour les suies de foyer domestique à bois des valeurs moyennes allant de 112 ng I-TEQ/kg de matière sèche (6 échantillons) à 2643 ng I-TEQ/kg (81 échantillons), voire 7706 ng I-TEQ/kg dans le cas de bois de zone côtière (chargé en sel). Concernant les cendres de foyer, l'étude indique respectivement des valeurs de 2700, 15900 ng I-TEQ/kg et 30600 ng I-TEQ/kg pour les concentrations totales en PCDD/PCDF (valeurs non pondérées).

#### 4.3. - Caractéristiques minéralogiques

Les MIDND étant des matériaux complexes [cf. § Composition élémentaire] et instables à court et moyen termes [cf. § Processus de maturation], sur le plan scientifique, l'analyse minéralogique est indispensable à la compréhension de leur comportement, tant du point de vue de l'évolution de la solubilité des éléments qui les composent, que du point de vue de l'évolution de leurs propriétés mécaniques. D'une part, certaines substances peuvent en effet se trouver fixées dans des espèces minérales plus ou moins stables. D'autre part, le développement de certains minéraux au sein des MIDND peut faire évoluer leurs propriétés physiques (gonflement, rigidification).

L'étude minéralogique des MIDND montre qu'ils sont constitués de trois types de minéraux :

- des minéraux « reliques », initialement présents dans les déchets incinérés, non modifiés par l'incinération ;

- des minéraux « de haute température », formés durant l'incinération, à partir de la fusion d'une partie des déchets ;
- des minéraux « de basse température », pouvant commencer à se former dès la sortie du four et/ou se développer plus ou moins rapidement durant le processus de maturation.

Sans chercher à être exhaustif, on peut toutefois, grâce à des travaux réalisés en France [Clozel et al., 1999 ; Bodéan et al., 2001 ; Delville et al. 2001], citer quelques minéraux représentatifs. Les minéraux reliques sont des minéraux constitutifs de roches naturelles comme les feldspaths potassiques, certains pyroxènes, le quartz, la biotite; proviennent aussi pour une part importante de verre alimentaire n'ayant pas fondu, et enfin de métaux. Les minéraux de haute température sont principalement des silicates (olivine calcique, plagioclases, géhlénite, clinopyroxènes, pseudowollastonite) et des oxydes (hématite, magnétite, spinelle). Les minéraux de basse température sont essentiellement des carbonates (calcite, sidérite), des sulfates (anhydrite, ettringite), des chlorures (halite, sylvite), des oxydes de fer.

Les MIDND sont constitués d'une phase scoriacée et d'une phase vitreuse. La phase scoriacée, de faible densité, hétérogène, concentre les résidus d'incinération : débris métalliques, débris de verre alimentaire, granulats naturels, fragments non transformés par l'incinération. Elle contient aussi des minéraux de haute température comme en particulier des phases couramment rencontrées dans les ciments (alite, larnite, portlandite). Elle contient enfin des minéraux de basse température : sulfates (anhydrite) et carbonates (calcite, sidérite). La phase vitreuse se forme à partir de la fusion de déchets. La composition de cette phase varie en fonction de la nature des déchets avec lesquels les débris de verre contenus dans les déchets sont mélangés. Les débris de verre atteignant leur point de fusion donneront par trempe du verre amorphe. Ceux qui auront le temps de cristalliser au cours de la phase refroidissement permettront la formation de minéraux de haute température au sein d'une phase vitreuse. Ces minéraux sont des alumino-silicates calciques ferrifères (olivine calcique, plagioclases, gehlenite, clinopyroxènes, pseudowollastonite). Ils présentent des formes dendritiques révélatrices d'un refroidissement rapide.

Même si la plupart des études minéralogiques réalisées ont tenté d'évaluer l'abondance des différentes espèces observées, la variabilité et la complexité chimique des MIDND est telle que ces études sont encore insuffisamment nombreuses pour qu'il soit possible de fournir des pourcentages d'abondance moyenne des différentes espèces recensées. On peut simplement dire que les principaux minéraux cristallisés présents dans les MIDND sont le quartz, les oxydes et hydroxydes de fer et d'aluminium, les chlorures, la portlandite, la calcite, l'anhydrite, ainsi que divers silicates. Des éléments comme Al, Cu et Fe notamment sont présents à l'état métallique. Les principales espèces minérales identifiées par les études menées sur les MIDND sont présentées dans le tableau suivant. Les espèces les plus souvent observées sont en caractères gras.

Famille	Espèce minérale	Formule	Références
Silicates	<b>Quartz</b>	SiO <sub>2</sub>	Stämpfli, 1992 ;
	<b>Géhlénite/Akermanite</b>	(Ca,Na) <sub>2</sub> (Al,Mg)(Si,Al) <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	Vehlow et al. 1992 ;
	<b>Clinopyroxènes</b>	Ca(Fe,Mg,Al)(Si,Al) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Kirby & Rimstidt, 1993 ;
	<b>Plagioclases</b>	(Ca,Na)(Si,Al) <sub>4</sub> O <sub>8</sub>	Eighmy et al., 1994 ;
	<b>Pseudowollastonite</b>	CaSiO <sub>3</sub>	Pfang-Stotz & Schneider, 1995 ;
	Alite	Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	Freyssinet et al., 1998 ;
	Larnite	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Clozel-Leloup et al., 1999 ;
	Mullite	Al <sub>2</sub> SiO <sub>5</sub>	Eypert-Blaison et al., 2000 ;
	Olivine calcique	(Fe,Mg,Ca)SiO <sub>4</sub>	Delville et al., 2001.
	Talc	Mg <sub>3</sub> (OH) <sub>2</sub> Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub>	
Oxydes	<b>Magnétite</b>	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	
	<b>Hématite</b>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
	<b>Wüstite</b>	FeO	
	Zincite	ZnO	
	Corindon	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
	Rutile	TiO <sub>2</sub>	
	Spinnelle	MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	
	Hercynite	FeAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>	
Hydroxydes	<b>Portlandite</b>	Ca(OH) <sub>2</sub>	
	GOETHITE	FeO(OH)	
	Bohemite-Bayerite-Gibbsite	Al(OH) <sub>3</sub>	
Carbonates	<b>Calcite</b>	CaCO <sub>3</sub>	
	Siderite	FeCO <sub>3</sub>	
Chlorures	<b>Halite</b>	NaCl	
	<b>Sylvite</b>	KCl	
	Nantokite	CuCl	
Phosphates	<b>Apatite</b>	Ca <sub>5</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (OH, F, Cl)	
Sulfates	Anhydrite	CaSO <sub>4</sub>	
	Gypse	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	
Sulfures	Pyrrhotite	FeS	

**Tab. 4** : Principales espèces minérales identifiées

L'analyse minéralogique des MIDND révèle aussi dans certains cas [Pfang-Stotz & Schneider, 1995 ; Freyssinet et al., 1998 ; Clozel-Leloup et al., 1999 ; Eypert-Blaison et al., 2000] l'existence de quelques composés des ciments : C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>S. Ceux-ci sont toutefois présents en trop faible quantité pour jouer un rôle dans la prise hydraulique des MIDND. Des observations de chantier attestent d'ailleurs d'une évolution de la rigidité des plates-formes en MIDND suite à des événements pluvieux [Auriol et al., 1999]. Il ne s'agit donc manifestement pas d'une prise hydraulique et, en l'état actuel des connaissances, on préférera parler simplement de rigidification [cf. § Caractéristiques géotechniques, Rigidification].

La formation d'hydroxyde d'aluminium (Al(OH)<sub>3</sub>), susceptible d'apparaître lorsque, avec le vieillissement, le pH du matériau descend en dessous de 10 [Alkemade et al., 1994], peut provoquer la formation de gonfles localisées. Le retrait de l'aluminium métal lors de la préparation à l'emploi des MIDND permet de prévenir ce risque.

## 5. Caractéristiques géotechniques

### 5.1. – Essais de caractérisation géotechnique

D'une manière générale, comme indiqué dans le guide technique D 9233 pour la réalisation des remblais et des couches de forme [SETRA-LCPC, 2000], dit aussi guide des terrassements routiers (« **GTR** »), les possibilités et les conditions d'emploi des matériaux utilisables en construction routière sont établies sur la base de paramètres de nature, de paramètres de comportement mécanique, et de paramètres d'état.

En l'état actuel des connaissances, c'est sur la base des critères habituels d'identification de nature (granularité, propreté ou argilosité), d'état (teneur en eau et indice portant immédiat) et de résistance mécanique (à la fragmentation et à l'usure) que sont décrits les graves de MIDND (**GTIF**).

Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques géotechniques mesurées sur les graves de MIDND en France. Nous pouvons noter que les graves de MIDND sont des matériaux frottants de part leur composition (taux de verre et de particules scoriacées à texture granuleuse) ce qui leur confèrent une bonne portance [[guide Rhône-Alpes mai 2005](#)]. Ainsi, la collecte du verre lors du tri sélectif implique une diminution de cette fraction (taux de verre) dans leur composition en entrée d'incinérateur. Ceci peut agir au niveau de leurs performances mécaniques en termes de résistance aux chocs et à l'usure [[thèse Eva Rendek, septembre 2006](#)].

Granularité		<b>0/20 mm ; 0/31,5 mm</b>	
Teneur en fines (passant à 0,08 mm)		4 à 12 % *	
Passant à 2 mm		20 à 50 %	
Propreté	Equivalent de sable (ES)	<b>30 à 55 ***</b>	
	Valeur de Bleu de méthylène (VBS)	<b>0,01 à 0,04 *</b>	
Résistance mécanique	Coefficient Los Angeles (LA)	35 à 50 **	
	Coefficient micro-Deval (MDE)	15 à 45 **	
Masse volumique apparente sèche ( $\square$ s)		1 à 1,2 t/m <sup>3</sup>	
Compactage Proctor		Normal	Modifié
	Teneur en eau à l'optimum (Wop)	<b>15 à 22 %</b>	<b>9 à 17 %</b>
	Masse volumique apparente sèche à l'optimum	<b>1,4 à 1,8 t/m<sup>3</sup></b>	<b>1,6 à 1,95 t/m<sup>3</sup></b>
	Indice portant immédiat (IPI)	<b>20 à 60</b>	-
	Indice CBR immédiat à l'optimum	<b>19 à 30</b>	30 à 120
	Indice CBR immédiat à l'optimum + 2%	10 à 18	10 à 28
	Indice CBR après immersion (4 jours)	22 à 30	30 à 110

**Tab. 5 :** Caractéristiques géotechniques courantes des graves de mâchefers - d'après GTIF, SETRA, 1997, Auriol et al, 1999 et François et al, 2000

\* Selon le **GTR**, une **VBS** inférieure à 0,1 (gramme de bleu pour 100 grammes de sol), associée à une *teneur en fines* inférieure à 12 %, devrait conduire à considérer que les MIOM sont assimilables à un sol insensible à l'eau. Or, les observations de chantier et

l'examen des courbes d'indices portants (*CBR*, *IPI*) montrent que les graves de MIDND sont sensibles à l'excès d'eau [Fraquet & Boucheny, 2001].

\*\* La forte variabilité des coefficients peut s'expliquer par la plus ou moins forte teneur en éléments durs dans les graves de MIDND (verre de bouteille en particulier), mais elle s'explique aussi en grande partie par la variabilité de l'intensité du lavage auquel aura été soumis l'échantillon avant l'essai (intensité d'agitation des tamis, intensité du jet d'eau, durée), qui peut ne laisser subsister dans l'échantillon que les éléments les plus durs. Les protocoles des essais *LA* et *MDE* peuvent être interprétés de façon très variables sur ce point, ce qui induit un biais.

\*\*\* Selon Auriol et al. [1999], la présence en grande quantité de particules scoriacées de densité apparente inférieure à 1 (par emprisonnement de bulles d'air) peut fausser les résultats de la mesure de propreté par l'équivalent de sable.

La figure ci-dessous illustre la sensibilité de la portance des graves de MIDND (ici indice CBR immédiat) à la teneur en eau [François et al., 2000]. Elle montre aussi que la portance des graves de MIDND peut être très bonne dans les bonnes conditions de teneur en eau. Plusieurs observations de chantier ont montré qu'après une chute de portance liée à des précipitations, les graves de MIDND récupéraient leurs caractéristiques de portance.

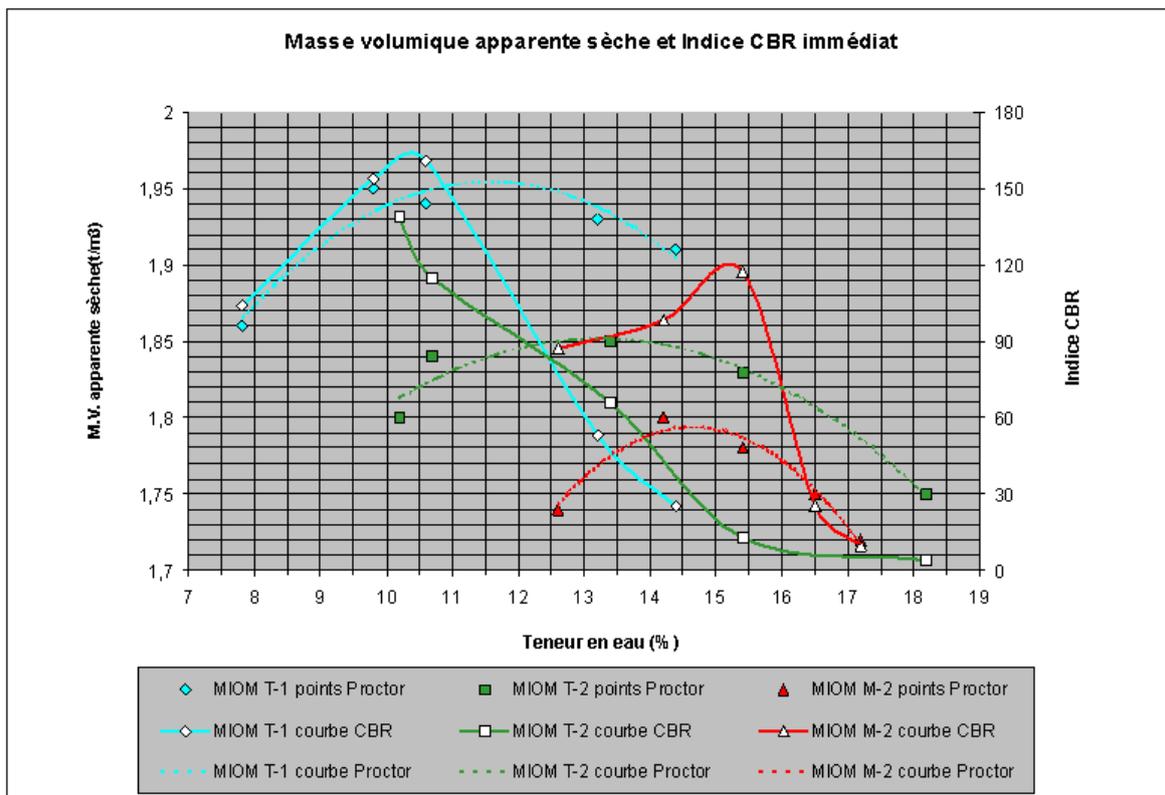


Fig 2 : Evolution de la masse volumique apparente sèche et de l'indice CBR immédiat en fonction de la teneur en eau

Rigidification : la rigidité à court terme des plates-formes réalisées en graves de mâchefers est généralement satisfaisante [GTIF], les modules statiques et dynamiques atteignent ou dépassent 50 MPa par couche de 40 à 50 cm d'épaisseur [Auriol et al., 1999]. De plus, on observe généralement une augmentation sensible de la rigidité avec

le temps. Sans que la cinétique de rigidification soit comparable à celle d'une grave-ciment, les graves de mâchefers apparaissent néanmoins significativement différents des GNT classiques [François, 2001b]. L'ensemble des réactions physico-chimiques permettant d'expliquer ce comportement n'est pas encore élucidé, aussi est-il raisonnable de ne pas tenir compte pour l'instant de cette propriété dans le dimensionnement des couches de chaussée [GTIF].

**Comportement au gel** : peu d'études de laboratoire ont été conduites sur le comportement au gel des mâchefers. De ces quelques études, les graves de MIDND apparaissent peu ou non gélifs. Toutefois, pour rassurantes qu'elles soient, ces études ne sont pas suffisamment nombreuses pour permettre de conclure pour les graves de MIDND en général. Comme l'indiquent la [note d'information CD 103](#) et le **GTIF**, si l'application l'exige, la gélivité du matériau utilisé devra être contrôlée par une étude particulière.

Les graves de MIDND se distinguent des granulats naturels, homogènes du point de vue pétrographique, par le fait qu'ils sont un mélange d'éléments de natures différentes [cf. § Composés organiques et § Caractéristiques minéralogiques], pas ou peu liés entre eux, se répartissant différemment selon les classes granulométriques, aux caractéristiques différentes.

Certains protocoles d'essais et certaines propriétés contrôlées par les essais géotechniques classiques apparaissent mal adaptés à la mise en évidence des propriétés réelles des graves de MIDND et à une bonne discrimination entre eux. Ces essais développés initialement pour des granulats naturels demeurent toutefois, pour l'heure, le seul moyen de classement des graves de MIDND en tant que matériau de construction routière dans le référentiel technique actuel.

## 5.2. – Classification pour emploi

### ▪ 5.2.1 Matériau de terrassement

Dans la norme **NF P 11-300**, les graves de MIDND sont classées dans **la famille F6** (Mâchefers d'incinération des ordures ménagères), subdivision de la classe F (Sols organiques et sous-produits industriels). Cette classification renvoie au **GTR**, dont les recommandations relatives aux graves de MIDND sont rapportées ci-dessous.

Selon le **GTR**, les paramètres considérés comme importants pour l'utilisation des matériaux de la famille F6 sont :

- 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 des valeurs pour ces paramètres, la famille F6 est divisée en 3 sous-classes :

- **F61** : « MIOM bien incinérés, criblés, déferraillés, faiblement chargés en éléments toxiques solubles, stockés pendant plusieurs mois » ;
- **F62** : « identique à F61 mais de production récente » ;

- **F63** : « MIOM mal incinérés, ou n'ayant pas subi de préparation, ou chargés en éléments toxiques solubles ».

**Pour l'emploi en remblai**, selon le **GTR**, seules les sous-classes **F61** et **F62** sont utilisables. Pour les matériaux F61 et F62, il est dit que les conditions d'emploi seront celles de la classe de sols ou de matériaux rocheux à laquelle ces matériaux pourront être assimilés sur la base des critères de classification des sols et matériaux rocheux du **GTR**.

Mais des exclusions existent. Ainsi sont exclus de cet emploi par le **GTR** :

- les matériaux F63, car pour eux des risques d'instabilité des ouvrages et de pollution sont craints ;
- l'utilisation des matériaux F61 et F62 en zone inondable et à moins de 30 mètres des cours d'eau, ainsi que dans les zones de captage des eaux potables.

**Pour l'emploi en couche de forme**, selon le **GTR**, seuls les matériaux F61 sont utilisables. Leurs conditions d'emploi sont celles de la classe de sols ou de matériaux rocheux à laquelle ils pourront être assimilés, à l'exception toutefois des solutions impliquant l'usage de liants hydrauliques du fait de risques de gonflement [**GTR**].

L'expérience accumulée sur les chantiers montre que l'assimilation d'une grave de MIDND à un matériau naturel (généralement de classes D2 - « graves alluvionnaires propres, sables », B3 - « graves silteuses », B4 - « graves argileuses » ou B5 - « sables et graves très silteux ») n'est pas satisfaisante car la similitude n'est jamais parfaite et peut conduire à des incohérences, notamment pour ce qui concerne la portance et la sensibilité à l'eau [Fraquet & Boucheny, 2001 ; **GTIF**]. Pour éviter ces problèmes, le **GTIF** propose une définition des possibilités d'emploi spécifiques aux graves de MIDND, sans assimilation à un matériau naturel.

#### ▪ 5.2.2 Matériau d'assise

La norme NF P 18-545 qui classe les granulats utilisables pour la construction des couches de fondation, de base et de liaison, classe les MIDND élaborés parmi les granulats « artificiels ».

## 6. Caractéristiques environnementales

Les MIDND sont des matériaux complexes, siège de nombreuses réactions physico-chimiques et chargés en composés potentiellement polluants, dont la fraction mobilisable et le rythme de relargage (induit par la propre évolution du matériau), doivent être appréciés pour les utiliser à bon escient. C'est pourquoi, dans de nombreux pays, divers essais comportementaux leur ont été, et leur sont encore, appliqués dans le cadre d'études en laboratoire : essais en colonnes, en « batch », sur des fractions granulaires différentes, sous des conditions de lessivage (rapport masse de liquide sur masse de solide) différentes, sous des conditions de pH différentes, avec des temps de contact différents.

## 6.1.– Caractéristiques physico-chimique des MIDND élaborés

L'essai préconisé par le ministère en charge de l'Écologie dans [l'arrêté du 18 novembre 2011](#), pour apprécier les caractéristiques environnementales des mâchefers élaborés, est l'essai de lixiviation issu de la norme NF EN 12457-2. Cette norme permet leur caractérisation par un essai en bûchée unique avec un rapport liquide-solide de 10 l/kg et une granularité inférieure à 4 mm (sans ou avec réduction de la granularité, remplaçant la norme X 31 210). L'arrêté préconise d'appliquer l'essai sur un échantillon représentatif du lot à caractériser. L'arrêté demande l'analyse des paramètres suivants : arsenic, baryum, cadmium, chrome total, cuivre, mercure, molybdène, nickel, plomb, antimoine, sélénium, zinc, fluorures, chlorures, sulfate, fraction soluble. En ce qui concerne les trois derniers paramètres, l'arrêté indique que pour être jugé conforme, il convient de respecter soit les valeurs associées aux chlorures et aux sulfates, soit de respecter les valeurs associées à la fraction soluble. Les normes d'analyse de chacun de ces paramètres, sont précisées par l'annexe 7 du [guide Sétra « Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière » appliqué aux Mâchefers d'Incinération de Déchets Non Dangereux \(MIDND\)](#).

Le tableau ci-dessous donne les valeurs limites à respecter pour les deux usages routiers de graves de mâchefers possibles dits de type 1 et de type 2 selon l'annexe de [l'arrêté de novembre 2011](#). Ces usages seront présentés dans le chapitre suivant « Utilisation dans les infrastructures routières ».

Paramètres lixiviation /	Valeurs limites à respecter en mg/kg de matières sèche	
	Usages de type 1	Usages de type 2
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
F <sup>-</sup>	60	30
Cl <sup>-</sup>	10 000	5 000
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	10 000	5 000
FS	20 000	10 000

Tab. 6 : Valeurs limites à respecter en mg/kg pour les usages routiers de type 1 et de type 2

## 6.2.– Effets des graves de MIDND utilisées en technique routière

L'appréciation des caractéristiques environnementales des mâchefers en laboratoire doit servir à évaluer les risques pour l'homme, les écosystèmes et au sens large l'environnement pour différents scénarios : l'entreposage, le chantier et l'ouvrage. Dans le cas des graves de MIDND, la question des risques pour la ressource en eau au niveau des trois scénarios se pose, ainsi que celle pour l'air au niveau des scénarios d'entreposage et de chantier. Les graves de MIDND étant en effet, pour ce qui est de la fraction fine, à l'état **pulvérulent**, le transport sous forme de poussières dans l'air, lorsqu'on se situe dans ces deux phases, ne doit pas être éludé *a priori*. Comme pour tout matériau pulvérulent, l'envol des poussières peut être maîtrisé en les maintenant à un taux d'humidité suffisant. Pour l'heure, c'est essentiellement la ressource en eau qui a fait l'objet d'études.

#### ▪ 6.2.1 Un matériau évolutif

Les MIDND sont le siège de réactions physico-chimiques internes qui leur confèrent un caractère évolutif sur le plan mécanique et environnemental, se répercutant notamment sur leur potentiel lixiviable, non seulement en phase d'entreposage mais aussi en place. On peut ainsi distinguer trois stades pour décrire leurs caractéristiques environnementales:

- le stade du matériau frais (MIDND bruts) ;
- le stade du matériau mûri (dits usuellement « mûré »), prêt à être utilisé (MIDND élaborés) ;
- le stade du matériau en place dans lequel, en l'état actuel des connaissances, malgré l'évolution probable du matériau sur plusieurs années, on ne distinguera pas de sous-phases (graves de MIDND).

La description des caractéristiques environnementales des MIDND à différents moments, ramène au processus de maturation et aux facteurs qui déterminent ces réactions [cf. § Le processus de maturation]. Or, les conditions réelles rencontrées par les mâchefers une fois incorporés dans la structure routière sont aujourd'hui a priori insuffisamment connues pour expliquer leur évolution en place. Ces conditions in-situ peuvent aussi être différentes d'une application à une autre en fonction de l'infiltration des eaux de pluie, des teneurs en eau dans la chaussée, de la température.

#### ▪ 6.2.2 Transfert vers l'eau

Il est difficile de donner un résultat type d'essai de lixiviation d'un mâchefer frais et d'un mâchefer mûri. Seuls des exemples seront donnés pour chaque stade permettant de montrer les effets de la maturation. L'important reste pour l'utilisateur de simplement veiller à respecter la réglementation.

##### - **Exemples de matériaux frais**

Des exemples de résultats à l'essai de lixiviation de mâchefers de fraîche production sont donnés ci-dessous. Les MIDND 1 sont des matériaux bruts. Les MIDND 2 n'ont subi qu'un grossier déferraillage. Ces deux matériaux ne sont pas destinés à la construction routière. Les MIDND 3 sont des matériaux un peu plus vieux (6 semaines), en cours de maturation sur une IME où ils ont subi une élaboration. Les paramètres mesurés sont différents de l'arrêté du 18/11/2011 (et de l'ancienne circulaire de mai 1994) mais permettent de mieux comprendre l'évolution des MIDND.

Paramètres	Unité	MIDND 1 *	MIDND 2 **	MIDND 3 ***
Age	semaines	4	2	6
Taux d'imbrûlés	%	2,2	3,3	4,4
Fraction soluble	%	4,5	-	3,0
Lixiviats				
pH des 3 lixiviats successifs L1/L2/L3		13,2 / 12,3 / 10,2	12,8 / 12,8 / 12,2	12,6 / 12,1 / 11,0
Pb	mg/kg	161	42,7	30,5
Cd	mg/kg	0,0148	0,0036	0,0044
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/kg	78,7	-	5 340
Cr total	mg/kg	3	0,30	0,96
Cu	mg/kg	1 110	29,9	23,7
Zn	mg/kg	18,5	25,2	7,3
Cl <sup>-</sup>	mg/kg	519	-	2 448
Fe	mg/kg	< 0,2	1,7	1,2
Al	mg/kg	938	692	459

\* Les MIDND 1 sont des matériaux bruts.

\*\* Les MIDND 2 n'ont subi qu'un grossier déferraillage.

\*\*\* Les MIDND 3 sont des matériaux en cours de maturation sur une IME (6 semaines).

**Tab. 7 :** Caractéristiques de mâchefers frais – *d'après François, 2003*

On voit que selon la circulaire de mai 1994, les taux d'imbrûlés sont conformes à la catégorie V : l'incinération des déchets est efficace. La fraction soluble est conforme à la catégorie V. La solubilisation du cadmium est faible. La solubilisation du chrome total peut même être inférieure au seuil fixé pour le seul chrome hexavalent. La solubilité du fer est très faible, malgré de fortes teneurs totales dans les MIDND, faute de déferraillage. Par contre, la solubilisation du plomb classe ces matériaux en catégorie M ou S. La solubilisation de l'aluminium est très importante. Les solubilisations du cuivre et du zinc ne sont pas négligeables. Enfin, on observe des pH très élevés qui expliquent la solubilisation importante d'éléments comme Al, Pb, Cu et Zn. Ceci est lié à la solubilisation des hydroxydes métalliques aux pH supérieurs à 11.

### - Exemples de matériaux en maturation

Sont présentés dans le tableau ci-dessous des exemples de résultats à l'essai de lixiviation de mâchefers en cours de maturation (MIDND élaborés), ou extraits de stocks ayant, quelques mois auparavant, été utilisés en construction routière (cas des MIDND 4).

Paramètres	Unité	MIDND 3*	MIDND 3*	MIDND 4**
Age	mois	5	6	18
Taux d'imbrûlés	%	4,7	4,2	-
Fraction soluble	%	2,9	2,3	-
Lixiviats				
pH des 3 lixiviats successifs L1/L2/L3		11,7 / 11,5 / 11,2	11,7 / 11,5 / 11,1	11,6 / 11,5 / 11,5
Pb	mg/kg	14,6	3,0	< 9
Cd	mg/kg	0,0018	0,0035	< 0,003
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/kg	6 518	4 883	979
Cr total	mg/kg	0,75	0,77	< 0,9
Cu	mg/kg	29,0	25,6	< 0,9
Zn	mg/kg	3,9	1,4	0,5
Cl <sup>-</sup>	mg/kg	3 198	2 383	2 114
Fe	mg/kg	2,2	< 0,2	< 0,9
Al	mg/kg	285	927	1 396

\* Les MIDND 3 sont des matériaux en cours de maturation sur une IME (5 et 6 semaines).

\*\* Les MIDND 4 extraits de stocks ayant été utilisés auparavant en construction routière.

**Tab. 8** : Caractéristiques de mâchefers en maturation – *d'après François, 2003*

Le pH des MIDND ayant avancés en maturation est plus faible. On peut toutefois observer des pH plus faibles que ceux-ci. Le pH des MIDND 3 ayant toutefois suffisamment baissé, on observe une forte diminution de la solubilisation du plomb [cf. § Processus de maturation]. Cette diminution est sensible aussi pour le zinc. La solubilisation de l'aluminium reste forte. Les sulfates, les chlorures et le cuivre ont des comportements inchangés. Les MIDND 3 ne sont pas encore en catégorie V après 5 mois (du fait du plomb notamment). Ils le deviennent à 6 mois. Les MIDND 4 montrent que le pH peut baisser très lentement et que le relargage en aluminium peut être encore significatif après plus d'un an.

#### - Exemples de matériau en place

Le tableau ci-dessous fournis deux résultats obtenus en France après 20 ans [[François et al., 2000](#)] sur des MIDND dont le système de production était, certes, différent d'aujourd'hui, mais dans lesquels le processus physico-chimique de maturation est bien le même.

Paramètres	Unité	MIDND 5*	MIDND 6**
Age	années	20	22
Taux d'imbrûlés	%	5,0	2,7
Fraction soluble	%	1,0	0,3
Lixiviats			
pH des 3 lixiviats successifs L1/L2/L3		8,1 / 8,1 / 8,4	9,5 / 9,5 / 9,6
Pb	mg/kg	0,1	1,2
Cd	mg/kg	0,05	0,004
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/kg	6 181	423
Cr total	mg/kg	< 0,03	0,16
Cu	mg/kg	1,1	0,8
Zn	mg/kg	3,8	2,0
Cl <sup>-</sup>	mg/kg	37	38
Fe	mg/kg	2,5	10
Al	mg/kg	< 6	15

\* Les MIDND 5 sont des matériaux anciens de 20 ans d'âge.

\*\* Les MIDND 6 sont des matériaux anciens de 22 ans d'âge.

**Tab. 9** : Caractéristiques de mâchefers en place – *d'après François, 2003*

Le pH des MIDND anciens est beaucoup plus faible que celui des MIDND de fraîche production. Ceci contribue à limiter la solubilisation des métaux. La solubilité des MIDND 5 et 6, est globalement beaucoup plus faible. Toutefois, la solubilisation des sulfates reste forte, contrairement à celle des chlorures. Le taux d'imbrûlés peut être fort en raison d'une moins bonne qualité de l'incinération à l'époque.

En ce qui concerne la recherche d'éléments polluants organiques sur des matériaux en place, contrairement à la circulaire de mai 1994, [l'arrêté du 18/11/2011](#) prend en compte les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les polychlorobiphényles (PCB – 7 congénères). Pour approfondir les effets de polluants organiques potentiellement contenus dans les graves de MIDND utilisées en techniques routières, deux études INERIS [2002 et 2006] se sont intéressées à la quantification et au transfert de dioxines contenues dans les graves de MIDND utilisés en sous-couches routières.

Le rapport de 2002 présente l'auscultation de cinq chaussées expérimentales anciennes composées de graves de MIDND traités ou non par un liant hydraulique (voir tableau 10). L'analyse des Poly-Chloro-Dibenzo-Dioxines / Poly-Chloro-Dibenzo-Furannes (PCDD/PCDF) est réalisé par couplage de la chromatographie gazeuse de haute résolution et de la spectrométrie de masse de haute résolution (HRGC/HRMS).

Sites	Age	Nature des graves de MIDND	PCDD/F dans MIDND (ng I-TEQ/kg)	Couche sous-jacente	PCDD/PCDF du sol sous-jacent (ng I-TEQ/kg)	PCDD/PCDF du sol de référence (ng I-TEQ/kg)
La Teste	1976	Non traité	14	sable	24,8	9,45
Le Mans	1978	Non traité	721	Limon et argile	7,23	1,05
Ronchin	1997	Non traité	235	Géotextile et limon	175	0,48
Hérouville	1997	Traité au liant hydraulique	9,01		2,31	
Viry-Chatillon	1997	Traité au liant hydraulique	9,01	Limon	4,40	

**Tab. 10** : teneurs en PCDD/PCDF des graves de MIDND et sols sous-jacents – d'après Inéris, C. Brazillet, R. Baderddine, 2002

De façon générale, ces campagnes d'auscultation [[Inéris, C. Brazillet, R. Baderddine, 2002](#)] ont montré un faible transfert des dioxines des graves de MIDND vers le milieu sous-jacent indépendamment de la nature du sol sous-jacent (limon, argile et sable) et de la teneur initiale en dioxines contenue dans les graves de MIDND.

Le rapport de 2006 [[R. Baderddine, I. Brouadaine, 2006](#)] expose deux auscultations complémentaires de routes constituées de graves de MIDND valorisables au sens de la circulaire de mai 1994 : l'une d'un remblai support de chaussée en région parisienne et l'autre en couche de fondation en région toulousaine. L'analyse des PCDD/PCDF est également effectué au moyen de HRGC/HRMS. Les valeurs de concentration de PCDD/PCDF contenues dans les graves de MIDND sont faibles (proche de l'ordre de grandeur des sols de référence) et varient en fonction des sites de 6,6 à 20 ng I-TEQ /kg MS. Les teneurs dans les sols sous-jacents sont également faibles allant de 0,5 à 2,55 mg I-TEQ/kg MS. Ces investigations confirment ainsi que l'utilisation de graves de MIDND récents [2002 et 2003] en techniques routières, n'implique pas de transfert de PCDD/PCDF vers les sols sous-jacents.

### 6.3.- Acceptabilité environnementale du matériau

Depuis 2011, le Cerema Direction Technique Infrastructures de Transports et Matériaux (DTerITM, ex-Sétra) a publié des guides sur les aspects environnementaux de l'utilisation en techniques routières de sous-produits industriels (dont les laitiers et les MIDND), souvent appelés actuellement coproduits industriels.

Le premier guide méthodologique « père » [[Sétra, 2011](#)] présente la méthodologie générale d'évaluation de l'acceptabilité environnementale applicable à l'ensemble des matériaux alternatifs élaborés à partir de déchets et destinés à être utilisés en technique routière. Il s'adresse aux professionnels des travaux publics et aux industriels qui veulent valoriser certains de leurs déchets. La finalité de cette démarche est de

proposer un référentiel à respecter dans le cadre du contrôle de conformité et ainsi de fixer les procédures à suivre, les valeurs limites à respecter selon un programme de caractérisation.

La notion d'acceptabilité du matériau y est définie comme un agrément donné « à un matériau élaboré à partir d'un déchet permettant de vérifier » d'un point de vue environnemental « qu'il est utilisable » dans un ouvrage routier pour un ou des usages (couche de forme, remblai par exemple). La démarche développée a pour objectif de fournir une méthodologie qui s'appuie sur la norme NF EN 12920+A1 (relargage des constituants d'un matériau vers l'eau) et sur le retour d'expérience CAREX à l'initiative de l'ADEME et conduit par l'IFSTTAR. Elle est développée en plusieurs étapes : (1) description du déchet et de son gisement, (2) proposition d'un usage routier en adéquation avec les caractéristiques des matériaux alternatif et routier, (3) caractérisation environnementale des matériaux alternatif et routier. La dernière étape de caractérisation (déchet et matériau routier) se déroule elle-même en plusieurs niveaux d'investigation proportionnels au risque potentiel de ces matériaux sur l'environnement.

Chaque guide d'application « fils » est focalisé sur un matériau en particulier et a comme objectif de promouvoir sa valorisation. Le guide spécifique aux MIDND décline les principes définis par l'arrêté du 18 novembre 2011.

#### **6.4. - Conditions de mise en œuvre, suivi et domaine d'emploi**

La préparation des mâchefers est réalisée sur les installations de maturation et d'élaboration (IME) qui se localisent sur le site de l'usine d'incinération [rubrique ICPE 2771] ou sur une plate-forme de recyclage indépendante [rubrique ICPE 2716 et/ou 2791]. Les exploitants des usines d'incinération ou d'IME réalisent la caractérisation de leur production de mâchefers selon la méthode préconisée par le ministère en charge de l'Écologie [cf. arrêté 18/11/2011 et cf. § Caractérisation physico-chimique des MIDND].

Ainsi, les exploitants des IME effectuent une caractérisation pour contrôler la qualité des mâchefers qu'ils réceptionnent et dont ils suivent l'évolution par lots. Cette gestion dite en « lot périodique » (production de MIDND sur une même période et IME, cf. art. 2 et 3 de l'arrêté 18/11/2011 et cf. § Définition) est modulée selon la quantité de MIDND produite par an :

- le suivi est mensuel si cette capacité est supérieure ou égale à 50 000 tonnes,
- ou il est trimestriel pour une production inférieure à 50 000 tonnes de MIDND produits (voire 6 mois sous certaines conditions).

Différentes interdictions sont précisées dans l'arrêté du 18/11/2011 [cf. art. 6] dont ne pas mélanger les MIDND issus de lots périodiques distincts, ne pas les diluer avec d'autres substances et ne pas les stabiliser.

La phase d'élaboration consiste au minimum à un tri (dont séparer les métaux et imbrûlés). Elle ne peut excéder un an et trois ans pour le stockage. La phase de formulation peut être effectuée pour ajouter un correcteur granulaire, mais en aucun cas pour mélanger des MIDND provenant de plusieurs usines d'incinération ou de divers lots périodiques. Enfin, ces processus d'élaboration, de formulation mais aussi d'échantillonnage doivent être formalisés dans un plan d'assurance qualité à la disposition des inspecteurs des installations classées. Les mâchefers sont aussi contrôlés au moment de leur commercialisation, l'exploitant d'IME fournit une Fiche

Technique Produit (FTP) classique ainsi qu'une fiche de classement environnemental caractérisant le lot utilisé. Des exemples de ces deux types de fiche sont proposés dans [le guide du Sétra appliqué aux MIDND d'octobre 2012](#). Les utilisateurs potentiels se tourneront ainsi vers les exploitants d'IME pour obtenir les caractéristiques environnementales requises du matériau qu'ils sont susceptibles d'utiliser.

Les domaines d'emploi des mâchefers valorisables sont divisés en deux types d'usages routiers (type 1 et type 2) définis dans [l'arrêté du 18/11/2011](#).

Les usages de type 1 sont les usages d'au plus 3 m de hauteur en sous-couche de chaussée ou d'accotement (remblai sous ouvrage, couche de forme, fondation, base et liaison) 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%. Les usages de type 2 sont les usages d'au plus 6 m 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.

L'ouvrage est dit recouvert si les matériaux routiers le constituant sont recouverts de matériaux naturels sur une épaisseur d'au moins 30 cm et s'il présente en tout point de son enveloppe extérieure une pente d'au minimum 5%. Relèvent également des usages de type 2, les usages de plus de 3 m et d'au plus 6 m de hauteur en sous-couche de chaussée ou d'accotement d'ouvrages routiers revêtus. Enfin, l'arrêté reprend les limites d'utilisation des mâchefers déjà définies dans la circulaire de mai 1994 et en ajoute deux supplémentaires :

- en dehors des zones inondables et des périmètres de protection rapprochée des captages d'alimentation en eau potable,
- à une distance de 30 m de tout cours d'eau, portée à 60 m en montagne ou dans une zone Natura 2000,
- en dehors des zones couvertes par une servitude d'utilité publique instituée au titre de la protection de la ressource en eau,
- en dehors des parc nationaux et zones de karst affleurants (nouvelles limites d'utilisation).

## 7. Aspects sanitaires

Aucune information n'est disponible sur ce sujet\_ aucune donnée disponible sur les poussières ?

## 8. Utilisation dans les infrastructures routières

En l'état actuel des connaissances et de la réglementation, l'utilisation des graves de MIDND doit suivre la double approche :

- des prescriptions de [l'arrêté du 18/11/2011](#) et du guide d'application Sétra de 2012, d'une part;
- des référentiels techniques de construction routière d'autre part.

Les limites l'utilisation des graves de MIDND et les **exclusions d'emploi** sont précisées au paragraphe 4 « Conditions de mise en œuvre, suivi et domaine d'emploi » du chapitre « Caractéristiques environnementales ».

Le **GTIF** [rédigé en 1998] constitue un très bon vade-mecum de la prise en compte des caractéristiques mécaniques connues des mâchefers, au travers des différents référentiels techniques utilisés en construction routière. En l'état actuel des connaissances, il constitue une très bonne synthèse pour l'utilisateur potentiel de graves de MIDND, en remblai, couche de forme et assises de chaussées. Les informations présentées ici en sont extraites. Pour plus détails, on consultera ce document.

Concernant le **compactage**, Auriol et al. [1999] indiquent que, de par leur composition, les graves de MIDND sont des matériaux à angle de frottement interne élevé. Ceci leur confère, lorsque leur teneur en eau est adéquate, une bonne portance et une excellente traficabilité. En revanche, leur compactage nécessite une énergie relativement importante pour vaincre ces forces de frottement (notamment à l'état sec). Des essais de laboratoire par vibrocompression aboutissent à classer les graves de MIDND comme « moyennement difficiles » (DC2) à « difficiles » (DC3) à compacter à l'état sec.

Plus récemment, il est reconnu que le verre, d'un point de vue géotechnique, est le principal constituant des graves de MIDND qui assure la résistance aux chocs et à l'usure [[Eva Rendek, 2006](#)]. Le guide régional « graves de recyclage » de Rhône-Alpes de novembre 2004 indique également qu'il s'agit d'un matériau frottant de part sa composition : particules scoriacées à texture granuleuse, le verre et les résidus métalliques anguleux ce qui lui confère une bonne portance.

## 8.1. - Utilisation en remblai

Pour les conditions d'emploi en remblais (qui ne concernent de fait que les matériaux **F61** puisque les graves de MIDND ont du suivre la maturation), le **GTIF** propose des conditions de compactage différentes en fonction de l'humidité des mâchefers et des conditions météorologiques (intensité de pluie, évaporation) au moment de la mise en œuvre.

Ainsi, sont utilisables les matériaux:

- **F61 h** (humide), dont l'état hydrique est défini par :  $10 \leq \text{IPI} \leq 20$  ; ou :  $1,2 W_{\text{OPN}} \leq \text{W} < 1,3 W_{\text{OPN}}$  ;
- **F61 m** (moyen), dont l'état hydrique est défini par :  $20 < \text{IPI}$  ; ou :  $0,8 W_{\text{OPN}} \leq \text{W} < 1,2 W_{\text{OPN}}$  ;
- **F61 s** (sec), dont l'état hydrique est défini par :  $0,6 W_{\text{OPN}} \leq \text{W} < 0,8 W_{\text{OPN}}$  ;

Exclusion :

Sont exclus par le **GTIF**, car inutilisables en l'état, les matériaux :

- F61 th (trop humide), dont l'état hydrique est défini par :  $\text{IPI} < 10$  ; ou :  $1,3 W_{\text{OPN}} < \text{W}$
- F61 ts (trop sec), dont l'état hydrique est défini par :  $\text{W} < 0,6 W_{\text{OPN}}$  ;

L'objectif de densification prescrit par le **GTIF** est dénommé de qualité q4, ce qui correspond par couche élémentaire à une densité moyenne supérieure ou égale à 95% de l'OPN et à une densité fond de couche supérieure ou égale à 92 % de l'OPN. Le **GTIF** précise toutefois que ces valeurs sont à considérer comme des repères et ne doivent pas être retenues comme prescriptions de compactage à cause de la trop grande variabilité de la référence Proctor pour une même origine de grave de

mâchefers. Le **GTIF** propose, comme le préconise le **GTR**, un tableau de compactage avec les paramètres Q/S, épaisseur compactée, vitesse de translation du compacteur.

## 8.2. – Utilisation en couche de forme

Le **GTIF** indique que, sous réserve de prise en compte dans la conduite du chantier de leur relative sensibilité à l'eau, l'ensemble des caractéristiques géotechniques des graves de mâchefers classés F61 (coefficients LA et MDE ; Dmax) autorise leur emploi en couches de forme, quel que soit le niveau de trafic de la chaussée à construire. C'est à dire que si dans la phase chantier, la couche de grave de MIDND est susceptible de voir son état hydrique modifié, ou bien d'être agressée par le trafic, elle devra être protégée par la première couche d'assise.

Comme le précise le **GTIF**, en l'absence de données suffisantes quant à un développement assuré d'une **rigidification** spontanée des graves de MIDND avec le temps, il est raisonnable de ne pas tenir compte de ce phénomène dans le dimensionnement des couches de forme. Même si une évolution positive peut être observée au fil des années, il faut adopter des dispositions constructives basées sur le comportement à court terme. Le **GTIF** propose une grille de dimensionnement et une grille de compactage des couches de forme en mâchefers.

L'objectif de compactage visé est la qualité q3 (densité moyenne supérieure ou égale à 98,5% de l'OPN et densité fond de couche supérieure ou égale à 96% de l'OPN). Pour les mêmes raisons que l'emploi en couche de remblais, il ne s'agit que de repères et non de prescriptions, d'où l'utilité de la grille de compactage (paramètres Q/S ; épaisseur, vitesse).

## 8.3. – Utilisation en assises de chaussées

Le **GTIF** indique que les caractéristiques géotechniques des graves de MIDND (assimilation à des granulats E et sables a) limitent leur emploi strictement à la **couche de fondation** de chaussées dont le trafic est inférieur ou égal à T4. Pour la conception et le dimensionnement des structures, le **GTIF** renvoie aux règles habituelles du Guide technique de conception et de dimensionnement des structures de chaussées [SETRA-LCPC, 1994], en donnant toutefois des exemples de structures supportant des trafic T5 et T4.

La réalisation d'une couche de roulement directement sur les graves de mâchefers (c'est à dire sans couche de liaison), est proscrite par le **GTIF** (et déconseillée par Auriol et al, 1999) à cause du risque de déformation ponctuelle déjà observé et provoqué par la formation d'espèces gonflantes (hydroxyde d'aluminium en particulier). Le **GTIF** précise toutefois que ce type de dégradation peut être évité avec une couverture suffisante des graves de MIDND, de l'ordre de 15 cm. Celle-ci servira à exercer une contre-pression.

Pour le compactage des graves de MIDND en assises de chaussée, on visera un objectif de qualité q2 en se référant aux Certificats d'Aptitude Technique des Matériels (CATM).

## 9. Références bibliographique

## 9.1. – Publications

Adam P., Dony Y. & Vincot Y., 1996. « Valorisation des mâchefers d'incinération en technique routière, évaluation de leur comportement en condition réelle d'utilisation », Déchets Sciences et Techniques, 4, pp. 11-14.

Alkemade M.M.C., Eymael M.M.Th., Mulder E. & de Wijs W., 1994. "How to prevent expansion of MSWI bottom ash in road construction ?, *Environmental aspects of construction with waste material*"s, Studies in Environmental Science 60, Elsevier Science, pp. 863-876.

Amokrane A., Blanchard J.M., Billard H., Chatelet-Snidaro L., Delineau T. & Bourdier C., 1998. « Le devenir des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères , Partie 2 : traitement des mâchefers. Effet de la maturation, du tamisage, du déferrailage et du lavage à l'eau », Déchets Sciences et Technique n° 11, pp. 31-38.

Auriol J.C., Debrandère G., Deloze J., Devaux P., Kergoët M. & Rengeard D., 1999. « L'emploi en technique routière des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères : quelques observations et recommandations en retour d'expérience », CD KL, XXIème congrès international de la route, Kuala Lumpur, 3-9 octobre 1999, 7 p.

[Baderddine R., Brouadaine I., 2006.](#) « Évaluation du transfert des composés organiques des MIOM utilisés en sous couche routière dans des ouvrages de construction récente », rapport INERIS – 00961906, 21 p.

[Badreddine R., Bartet B., François D. & Pépin G., 2003,](#) « Impact sur les sols des dioxines de MIOM utilisés en technique routière », Déchets – revue francophone d'écologie industrielle n° 29, pp. 16-21.

[Bartet B. & Drouadaine I., 2001,](#) « Valorisation des MIOM en technique routière : suivi environnemental de produits routiers à base de MIOM sur chaussées tests », Colloque MIOM 2001, actes, Orléans, 16-18 octobre 2001, BRGM.

Bartet B., Pépin G. & Nominé M., 2001. « Dioxine dans les MIOM. Teneurs observées et étude préliminaire de leur potentiel de transfert vers l'environnement », Colloque MIOM 2001, actes, Orléans, 16-18 octobre 2001, BRGM.

Bauchard M., 1979, « Scories d'incinérations et construction routière », Colloque Strasse und Verkehr, actes, Genève, 23 mars 1979.

Bodénan F., Piantone P. & Chatelet-Snidaro L., 2001. « Phases minérales de basse température et processus de maturation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères », Colloque MIOM 2001, actes, Orléans, 16-18 octobre 2001, BRGM.

Boisseau P., 2001. « Le gisement des MIOM en France : le parc d'usines, les grandes tendances, incinération, résidus produits, résidus valorisés », Colloque MIOM 2001, actes, Orléans, 16-18 octobre 2001, BRGM.

[Brazillet C., Badreddine R., 2002](#), « Caractérisation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères. Étude expérimentale de l'impact des dioxines sur l'environnement », Programme « Déchets industriels » DRC 01, 19 p.

Clozel-Leloup B., Bodéan F. & Piantone P., 1999. "*Bottom ash from municipal waste incineration : mineralogy and distribution of metals. In : Méhu, J., Keck, G., Navarro, A. (eds)*", Waste stabilization and environment, pp. 46-51.

Delville N., Montel J.M., Boivin P. & Torrent G., 2001. « Phases reliques et phases de haute température : répartition des métaux lourds », Colloque MIOM 2001, actes, Orléans, 16-18 octobre 2001, BRGM.

Drouadaine I., Seigneurie C. & Jozon C., 1997. « Etude de l'impact environnemental de la valorisation des mâchefers d'incinération en technique routière », TSM n°10, Octobre, pp. 48-54.

Eighmy T.T., Eusden J.D., Marsella K., Hogan J., Domingo D., Krzanowski J.E. & Stämpfi D. (1994), Particle petrogenesis and speciation of elements in MSW incineration bottom ashes, Environmental aspects of construction with waste materials, J. Goumans, H. van der Sloot & T. Aalbers editors, Elsevier Science B.V vol 60, 111 p.

Eypert-Blaison C., Yvon J., Lhote F. & Kohler A., 2000. « Spéciation des métaux dans les mâchefers et reconstitution des réactions. » Les techniques de l'industrie minière n° 6, pp. 40-52.

[François D., Legret M., Demare D., Fraquet P. et Berga P., 2000](#). « Comportement mécanique et environnemental de deux chaussées anciennes réalisées avec des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères », Bulletin des laboratoires des Ponts et Chaussées n° 227, pp. 15-30.

François D., 2001a. « Détermination du potentiel polluant. » Journées Techniques Route et pollution des eaux et des sols, actes, Nantes, 27-28 mars 2001, LCPC.

François D., 2001b. « Propriétés mécaniques des MIOM. Etudes en laboratoire », Journées Techniques Route et pollution des eaux et des sols, actes, Nantes, 27-28 mars 2001, LCPC.

François D., 2001c. « Retour d'expérience en construction routière : évaluation du comportement environnemental et mécanique de MIOM dans des chaussées sous trafic », Colloque MIOM 2001, actes, Orléans, 16-18 octobre 2001, BRGM.

François D., 2003. « Relargage en métaux de MIOM à différents stades de leur filière de valorisation », Techniques Sciences et Méthodes, 4, pp. 91-98.

Fraquet P. & Boucheny C., 2001. « Utilisation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères en technique routière », Journées Techniques Route et pollution des eaux et des sols, actes, Nantes, 27-28 mars 2001, LCPC.

IFEN, 1999. « L'environnement en France », Ed. La Découverte, 472 p.

International Ash Working Group, 1997. "*Municipal solid waste incinerator residues*", Elsevier, 974 p.

Kirby C.S. & Rimstidt J.D., 1993. "*Mineralogy and surface properties of municipal solid waste ash*", Environmental science technology vol. 27, n° 4, pp. 652-660.

Krass K. & Radenberg M., 1994. "*Verwertungsstraten von industriellen Nebenproduk und recycling-Baustoffen*", Beihefte zur mull and Abfall n° 31, pp. 11-15.

Lac C. & Fourcy P., 2001. « Intérêt, enjeux et bilans des installations de maturation et élaboration des mâchefers », Colloque MIOM 2001, actes, Orléans, 16-18 octobre 2001, BRGM.

Marchal T., 1995. « Des MIOM pour le chantier de la déviation de Malzéville », RGRA n° 729, Mai, pp. 35-38.

Méhu J. & Orphelin M., 2001. « Gestion des MIOM dans l'Union Européenne : essais et usages », Colloque MIOM 2001, actes, Orléans, 16-18 octobre 2001, BRGM.

Paris I., Hubscher V. & Leroy M.J.F., 1997. « Etude du comportement de mâchefers de DIS utilisés en technique routière, comparaison avec des mâchefers d'OM », TSM n°4, avril, pp. 27-34.

[Pépin G., Bartet B. & Nominé M., 2001.](#) « Caractérisation et détermination de la matière organique dans les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères », Colloque MIOM 2001, actes, Orléans, 16-18 octobre 2001, BRGM.

Pfang-Stotz G. & Schneider J., 1995. "*Comparative studies of waste incineration bottom ashes from various grate and firing systems conducted with respect to mineralogical and geochemical methods of examination*", Waste management and research n° 13, pp. 273-292.

Ramade F., 2000. « Dictionnaire encyclopédique des pollutions. Les polluants : de l'environnement à l'homme », Ediscience international, 690 p.

[Rendek E., 2006.](#) « Influence des procédés de la filière traitement thermique sur les caractéristiques et les évolutions bio-physico-chimiques des Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères (MIOM) » thèse de l'INSA de Lyon, soutenue le 14 septembre 2006, 211 pages.

Vehlow J., Pfrang-Stotz G. & Schneider J., 1992. "*Restoffe-charakterisierung, behandlung, verwertug*", Symposium 25 Jahre LIT 5 Jahre TAMARA, Forschung und Entwicklung in Kernforschungszentrum Karlsruhe zur Hausmüllverbrennung Kfk, Karlsruhe, 124 p.

## 9.2. – Documents techniques

ADEME, 2002. « Plates-formes de traitement et de maturation des mâchefers ». Bilan de 32, opérations françaises aidées par l'ADEME, Rapport détaillé, 91 p.

Bodénan F., Piantone P., Azaroual M., Baron M., Bény C., Crouzet C. & Richalet G., 2000. « Maturation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères : mise au point d'un test prévisionnel », Ministère de l'Environnement, Rapport BRGM/RP-50001-FR, 56 p.

Cercle National du Recyclage, 1997. « Parler le même langage pour tous se comprendre ». Glossaire du Cercle National du recyclage à l'usage des élus et des responsables de collectivités locales en charge de la gestion des déchets, 24 p.

Conseil Régional de Rhône-Alpes, Direction départementale de l'équipement du Rhône, Conseil Général du Rhône, Communauté urbaine Grand Lyon, Fédération Les travaux publics de Rhône-Alpes, UNICEM de Rhône-Alpes, SPRIR Rhône-Alpes, 2005. [« Guide d'utilisation en travaux publics. Graves de recyclage, graves recyclées de démolition et de mâchefer. », version 2, mai 2005, 35p.](#)

Fléhoc C., Girard J.P., Bodéan F., Bény C., Crouzet C., Lafforgue M. & Piantone P., 2000. « Validation du processus de maturation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères par le CO<sub>2</sub> atmosphérique : étude isotopique ». Rapport BRGM/RP-500026-FR, 34 p.

Freyssinet P., Piantone P., Azaroual M., Itard Y., Clozel B., Baudron J.C., Hau J.M., Guyonnet D., Guillou-Frottier L., Pillard F. et Jezequel P., 1998. « Evolution chimique et minéralogique des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères au cours de la maturation », Documents du BRGM n° 280, 146 p.

ORDIF, 1996. « Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères d'Ile-de-France. Caractéristiques, productions et flux. Etude sur les conditions de leur valorisation », 151 p. + annexes.

Pihl K.A., Ahrentzen P. & Kalsmose K., 1989. "*Subbase of incinerator residues. Guidance-standard specifications. General Working Procedure, Miljoministeriet/Skov-og Naturstyrelsen/Statens Vehjlaboratorium*", Laboratoire rapport n° 66, Vejdirektoratet.

Préfecture d'Ile-de-France, Conseil Régional d'Ile-de-France, UNICEM, SPIR Ile-de-France, Contrat de plan interrégional du bassin parisien, SYCTOM, SVDU, 1998. [« Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-de-France, Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères », 44 p.](#)

SETRA, 1997. Note d'information CD 103, « Utilisation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères en technique routière », 6 p.

SETRA-LCPC, 1981. « Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic ».

SETRA-LCPC, 2000. « Guide technique pour la réalisation des terrassements et couches de forme » (GTR). SETRA-LCPC, juillet 2000, 2<sup>ème</sup> édition, 99p.

SETRA-LCPC, 1994. « Guide technique D 9511. Conception et dimensionnement des structures de chaussées. »

Silvestre P. & Rampignon J.-P., 1995. « Valorisation en structure routière du mâchefer d'incinération d'ordures ménagères de l'usine de Lyon-Sud », TSM n°5, mai, pp. 427-430.

Stämpfli D., 1992. "*Cement and bottom ash chemistry. A study with X-ray powder diffraction,*" Environmental research group final report, University of New Hampshire, 69 p.

## 10. Auteurs et relecteurs

Auteurs OFRIR1	Denis François (LCPC)
Relecture d'experts OFRIR1	Jean-Claude Auriol (LCPC), Yves Brosseaud (LCPC), François de Larrard (LCPC), Jérémie Domas (INERIS), Guillaume Gay (INERIS), Agnès Jullien (LCPC), Vincent Lédée (LCPC), Patrice Piantone (BRGM), Pierre Silvestre (CETE Lyon)
Relecture comité de pilotage	Laurent Château (ADEME), Delphine Chevalier (SETRA), Pierre Dupont (SETRA), Frédéric Leray (Ministère de l'environnement), Hervé Vanlaer (Ministère/DPPR), Jean-Pierre Lemesle (FNTP), Daniel Berrebi (FNTP/USIRF)
Relecture d'experts OFRIR1	Céline Chouteau (CETE Nord-Picardie), Guillaume Gay (INERIS) Oumaya Marzouk (CETE Lyon), Denis François (IFSTTAR)
Auteurs OFRIR2	Sylvie Nouvion-Dupray
Relecture d'experts OFRIR2	Patrick Vaillant (CEREMA)
Relecture bureau	Agnès Jullien (IFSTTAR)
Date de mise en ligne, version finale	19/12/2014