

Document public

Contribution du BRGM au projet OFRIR

Rapport final

BRGM/RP-53870-FR

avril 2005

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM 2004-EPI-038

P. Piantone

Vérificateur :

Original signé par :
Jean-Yorick KOCH-MATHIAN

Approbateur :

Original signé par :
Philippe FREYSSINET

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.

Mots clés : Site web, Route, Recyclage, Produits, Déchets.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Piantone P. (2005) – Contribution du BRGM au projet OFRIR. Rapport final. BRGM/RP-53870-FR, 335 p., 7 ill., 15 ann.

© BRGM, 2005, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le projet OFRIR a débuté avec, comme objectif, de constituer une base de connaissances et de données concernant les produits susceptibles d'être utilisés en technique routière. En effet, pour une meilleure maîtrise du recyclage, il importe d'apporter une information fiable à tout ceux, maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvre, entreprises, fournisseurs de matériaux, qui participent à l'acte de construire. Les questions environnementales, généralement jugées les plus critiques, sont celles pour lesquelles la transparence est la plus nécessaire : ne pas traiter ces questions au grand jour laisse la place aux rumeurs et au développement de craintes infondées qui sont les plus sûrs obstacles au développement du processus.

En effet, ce n'est que dans l'association des divers spécialistes, et dans un effort de dialogue entre scientifiques, praticiens et le public à travers les Organisations Non Gouvernementales, que pourront s'élaborer collectivement des pratiques saines et des politiques soutenables sur le long terme.

Le projet a atteint en 2003 avec l'ouverture du site un stade pré-opérationnel pendant lequel une montée en régime est attendue. Ce stade a pour objectif de corriger les défauts ergonomiques et assurer une dernière finition des rubriques pour effacer les dernières scories. En outre, une ouverture plus large des rubriques contenues, et non seulement des résumés, doit être entérinée lors du prochain comité de pilotage (courant mai 2005).

Actuellement, le site contient 14 rubriques produits, texte et références bibliographiques incluses sur 16 prévues. 118 membres, dont 81 extérieurs (n'appartenant pas aux entités administratives ou autres participant au projet), sont inscrits au club d'échange, nombre dans lequel il faut compter 8 % d'européens.

Le BRGM a, après relecture des 15 rubriques disponibles, proposé des améliorations de fond et des améliorations éditoriales.

Le travail a été fait dans le cadre de la fiche 8 de la convention BRGM MEDD CV 03 000 755.

Sommaire

1. Introduction	7
2. Fonctionnement du site et mise à jour du site Ofrir	9
2.1. PRÉSENTATION DES DONNÉES	9
2.2. DROITS D'ACCÈS AUX DONNÉES	9
2.3. CONTENU DISPONIBLE	10
2.4. INFORMATIONS GÉOGRAPHIQUES LIÉES À PRODUIT	12
2.5. INFORMATIONS IMPORTÉES DANS UNE RUBRIQUE	12
2.6. LEXIQUE	13
2.7. VALIDATION DE DONNÉES ET INTÉGRATION DE NOUVELLES DONNÉES, PRINCIPE	14
3. Action du BRGM dans le cadre d'Ofrir en 2004	17

Liste des illustrations

Illustration 1 - Page d'accueil club d'échanges de données avec cliquables sur la gauche les rubriques produits en ligne au 18 avril 2005)	10
Illustration 2 - Schéma de fonctionnement du site	11
Illustration 3 - Bilan sur les documents en ligne.	11
Illustration 4 - Présentation géographique des données du site OFRIR (lien cliquable). Ici les unités d'incinération produisant des MIOM recyclés en technique routière.	12
Illustration 5 - Exemple de contenu d'une rubrique produit du site OFRIR avec mot de lexique (le lexique est un dictionnaire spécifique à Ofrir).	14
Illustration 6 - Principe de fonctionnement de l'observatoire OFRIR	15
Illustration 7 - Exemples de corrections majeures. Pour le reste* voir les corrections au fil du texte dans les annexes.	20

Liste des annexes

Annexe 1 - Laitiers d'aciérie	21
Annexe 2 - Textes généraux	45
Annexe 3 - Références	73
Annexe 4 - Matériaux de démolition	87
Annexe 5 - Matériaux bitumineux recyclés.....	105
Annexe 6 - Cendres volantes	125
Annexe 7 - Déchets miniers	143
Annexe 8 - Laitiers de hauts fourneaux.....	165
Annexe 9 - Laitiers de non ferreux	185
Annexe 10 - MIOM.....	199
Annexe 11 - Phosphogypses.....	225
Annexe 12 - Pneus	249
Annexe 13 - Sables de fonderie	271
Annexe 14 - Schistes houillers	289
Annexe 15 - Les boues de curage.....	313

1. Introduction

La route, au contraire d'autres domaines du génie civil, a fait continuellement l'objet d'utilisation de résidus accompagnés ou non d'expérimentations en vraie grandeur, sous la forme de planches d'essais, de mises en œuvre expérimentales visant à tester des matériaux ou des techniques innovantes. Malheureusement, l'expérience acquise reste souvent confidentielle et le suivi de ces planches n'est pas toujours possible au-delà de quelques années, en particulier lorsque les acteurs locaux changent. Lorsqu'il s'agit de matériaux soulevant des questions environnementales (dont l'impact ne peut se produire qu'à moyen ou long terme), cette rupture de chaîne est d'autant plus regrettable.

D'une façon générale, l'information existante sur le recyclage est disséminée géographiquement, la réutilisation des matériaux étant souvent une affaire locale -et thématiquement- ce sujet pouvant être étudié sous divers aspects : géotechnique, routier, environnemental, économique, juridique, etc. Or, pour ce qui concerne le recyclage dans la route, personne aujourd'hui ne possède la totalité des compétences géotechniques, routières, environnementales, économiques, juridiques, etc., nécessaires pour une gestion optimale de la ressource en matériaux.

C'est sur la base de ces considérations que le projet OFRIR (Observatoire Français du Recyclage dans les Infrastructures Routières) a été lancé au printemps 2002, après une phase de préparation d'une année environ. Outre le LCPC et le réseau technique de l'Équipement, le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) et l'INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques) prennent une part active au projet.

Les financements rassemblent des ressources propres des organismes cités, ainsi que des subventions spécifiques du METLTM/DRAST, DR (Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer/Direction des Affaires Scientifiques et Techniques et Direction des routes), du MEDD/DPPR (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable/Direction de la Prévention, des Pollutions et des Risques), de l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie) et du SETRA (Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes).

Le projet OFRIR, qui a débuté avec, comme objectif, de constituer une base de connaissances et de données concernant les produits susceptibles d'être utilisés en technique routière, est ouvert au public. Il a atteint un stade pré-opérationnel pendant lequel une montée en régime est attendue. Ce stade a pour objectif de corriger les défauts ergonomiques et assurer une dernière finition des rubriques pour effacer les dernières scories. En outre, une ouverture plus large des rubriques contenues, et non seulement des résumés, doit être entérinée lors du prochain comité de pilotage (courant mai 2005).

Actuellement, le site contient 14 rubriques produits, texte et références bibliographiques incluses sur 16 prévues. 118 membres dont 81 extérieurs (n'appartenant pas aux entités administratives ou autres participant au projet) sont inscrits au club d'échange, nombre dans lequel il faut compter 8 % d'européens.

2. Fonctionnement du site et mise à jour du site Ofrir

Le site OFRIR, dont la page d'accueil est présentée en illustration 1, a été ouvert le 4 août 2003 au public. Quant à la partie privée du site, réservée au club d'échanges des données (voir menu Connexion/Charte du club sur la page d'accueil), elle a été ouverte le 1^{er} septembre 2003. OFRIR met donc à disposition des acteurs nationaux de la route une information classée, synthétisée et ayant reçu un certain niveau de validation, de façon à favoriser les démarches de recyclage et d'utilisation des matériaux locaux, tout en signalant les différents obstacles, notamment d'ordre géotechnique et environnemental.

Comme le montre l'illustration 1, quatorze rubriques produits sont déjà disponibles (menus verticaux à gauche cliquables au dessous de la rubrique nommée « Référence »). Chaque rubrique produit comporte les paragraphes suivants : résumé, définition du produit, textes spécifiques de référence, origine / formation / élaboration, caractéristiques physio-chimiques, caractéristiques environnementales, caractéristiques géotechniques, risques sanitaires, utilisation dans les infrastructures routières, sources sur le territoire français, emplois répertoriés et bibliographie. Une présentation géographique avec pictogrammes est également proposée.

2.1. PRÉSENTATION DES DONNÉES

Les rubriques sont présentées sur l'écran d'accueil à partir de celle nommée « Référence » présentée en tête de liste (ill. 1). En effet, cette rubrique a pour objet de décrire le référentiel d'usage dans le domaine routier et donc de rappeler les règles usuelles d'emploi en travaux publics pour les matériaux et granulats conformes aux normes et aux spécifications du domaine.

2.2. DROITS D'ACCÈS AUX DONNÉES

Actuellement, la rubrique « Référence » est ouverte dans sa totalité au grand public, à l'exception des fichiers associés aux liens cliquables attachés à la présentation géographique (ill. 2). Par contre, seul le résumé a été ouvert pour le grand public dans le cas des autres rubriques. Les pictogrammes sont montrés sur la carte de France, mais les liens cliquables associés ne sont jamais actifs pour le grand public. De ce fait, outre les éléments de contenus spécifiques au domaine routier, cette rubrique « Référence » permet de montrer l'organisation des paragraphes des rubriques et de découvrir les fonctionnalités de navigation (ensemble des liens cliquables dans les rubriques et pictogrammes sur la carte de France). Au-dessus des menus cliquables correspondant aux rubriques, est proposé un moteur de recherche par mot-clé, qui permet d'accéder plus rapidement à l'information, lorsqu'elle existe, en fonction des droits d'accès de l'internaute.

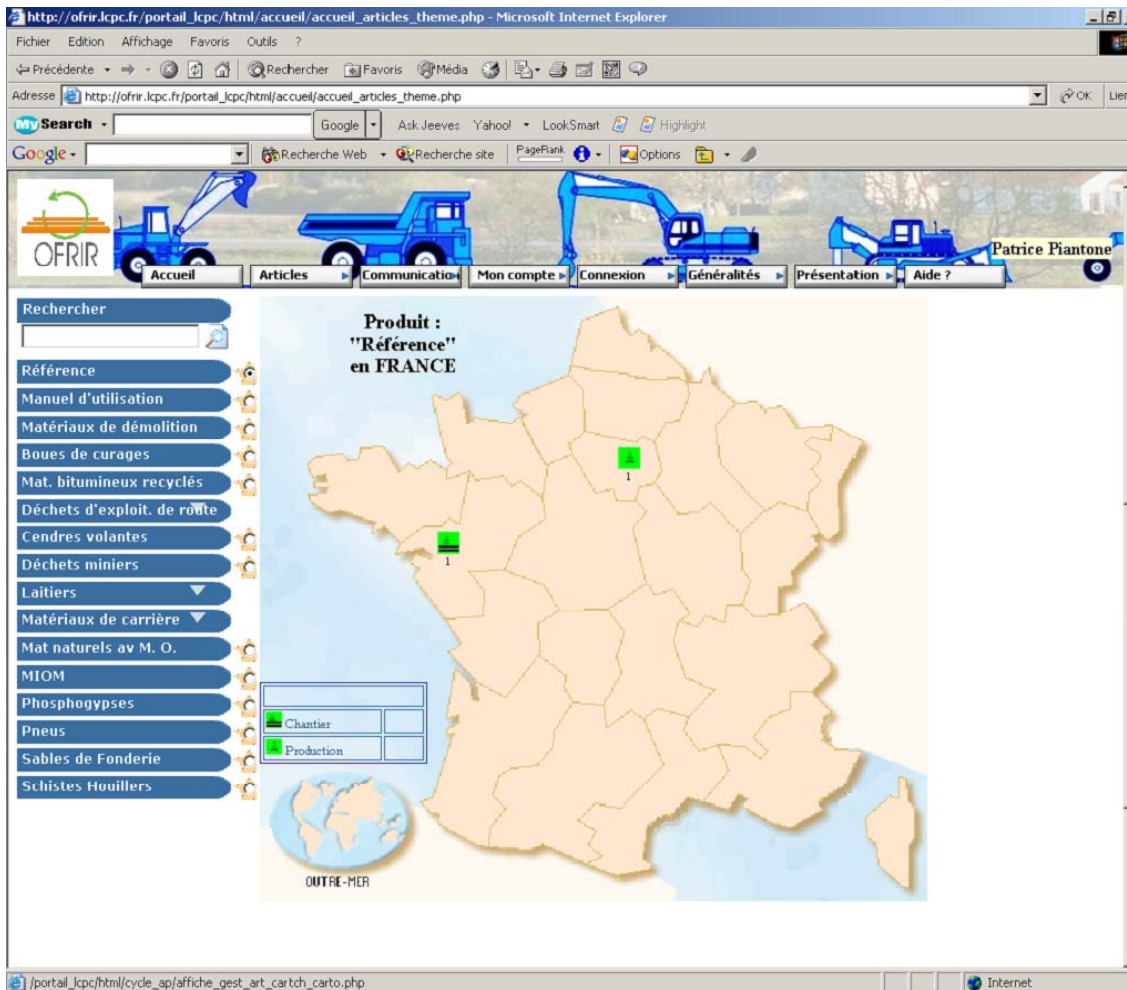


Illustration 1 - Page d'accueil club d'échanges de données avec cliquables sur la gauche les rubriques produits en ligne au 18 avril 2005.

Ici, l'implantation des plates-formes de traitement à l'échelle du pays (pictogrammes simples) et d'un chantier répertorié (pictogramme souligné, site en cours d'enrichissement).

2.3. CONTENU DISPONIBLE

Outre cette rubrique « Référence », sont en ligne pour l'instant les rubriques suivantes : « Matériaux de démolition », « Boues de curage », « Matériaux bitumineux recyclés », « Cendres volantes », « Déchets miniers », « Laitiers » (trois rubriques), « Matériaux de carrière », « Matériaux naturels avec matière organique », « MIOM » (Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères), « Phosphogypses », « Pneus », « Sables de fonderies » et « Schistes houillers ». D'ici la fin 2005, le site comprendra en tout seize rubriques « Produits » et des informations géographiques associées plus conséquentes, notamment enrichies des données issues de la contribution des membres du club (ill. 3).

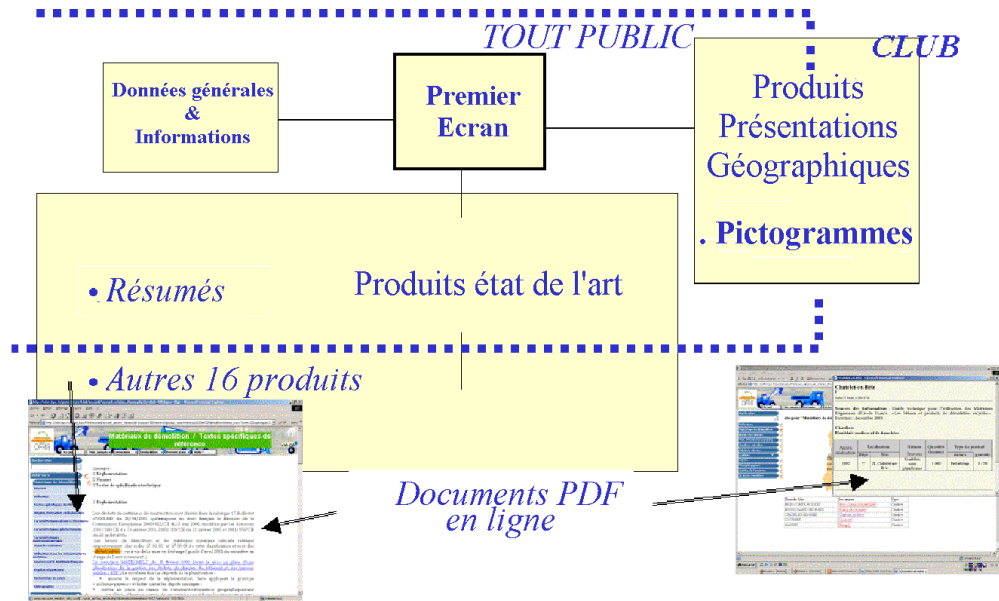


Illustration 2 - Schéma de fonctionnement du site.

Ces nouvelles données pourront en particulier s'intégrer dans la base sous la forme de liens cliquables associés soit à la présentation géographique, soit au texte de la rubrique produit ou encore sous la forme d'une référence à des documents publiés dans la littérature. Plus particulièrement, le cas des liens est détaillé ci-après.

Produits	État de l'art	Production locale	Travaux routiers
Référence	8	Non considéré	Non considéré
Matériaux de démolition	3	0	12
Boues de curage	14	0	0
Matériaux bitumineux recyclés	13	0	0
Cendres volantes de charbon	1	0	0
Déchets miniers	11	0	0
Laitiers de haut-fourneaux	3	4	0
Laitiers d'aciérie	9	0	0
Laitiers non ferreux	6	0	0
MIOM	15	59	16
Phosphogypses	38	1	0
Pneus	0	0	0
Sables de fonderie	3	14	0
Schistes Houillers	8	21	0
Matériaux naturels avec M.O.			
TOTAL	132	99	28

Illustration 3 - Bilan sur les documents en ligne.

2.4. INFORMATIONS GÉOGRAPHIQUES LIÉES À PRODUIT

Dans cette partie du site, une distinction est faite, grâce à deux pictogrammes légèrement différents, entre des données relatives à des sites de production ou à des sites de chantiers ; le pictogramme est matérialisé sur la carte de France à l'emplacement de la commune auquel il est rattaché (ill.1 et 6). Chaque pictogramme, nécessairement cliquable, ouvre une fois parvenu à l'échelle administrative du département, une fenêtre qui contient de l'information.

Selon l'information mise à disposition, la fenêtre ouverte peut elle-même renvoyer à un fichier « .pdf » attaché cliquable (ill. 2) ; ce mode de présentation est particulièrement adapté à des textes imprimés sous un format d'édition particulier et ils sont ainsi présentés conformément à leur état d'origine (passage au scanner).

site pour "MIOM" dans le département 22 - Cotes-d'Armor

Nom du Site	Document	Type
PLUZUNET	"Val d'Armor"	Production
SAINTE-BRIEUC	"Novergie Ouest"	Production
TADEN	"Eurovia"	Production

Lien cliquable

Illustration 4 - Présentation géographique des données du site OFRIR (lien cliquable). Ici les unités d'incinération produisant des MIOM recyclés en technique routière.

2.5. INFORMATIONS IMPORTÉES DANS UNE RUBRIQUE

Dans cette partie du site, l'information présentée en premier niveau de lecture (cf. exemple MIOM proposé en ill. 5) se présente sous la forme d'un texte agrémenté de figures, tableaux et schémas. Pour garantir une certaine homogénéité à l'échelle du site, la rubrique proposée en premier niveau de lecture pour chaque produit a été

limitée à 20 pages. D'autre part, les paragraphes types de chaque rubrique sont dissociés pour permettre à l'internaute de ne pas avoir trop d'information à lire d'un seul tenant (paragraphes à cliquer séparément, cf. ill. 5 sous le titre MIOM). À l'intérieur de chaque paragraphe et dès le premier niveau de lecture, deux types de liens cliquables sont proposés. Le premier type de liens concerne les références citées dans le texte ; ils ouvrent là encore une fenêtre qui comprend un cartouche entête d'un document attaché au format « .pdf » ; le cartouche permet l'emploi du moteur de recherche du fait que les fichiers « .pdf » sont générés comme des images ; le contenu de tels fichiers « .pdf » peut être de type rapports, publications ou autres documents. Le deuxième type de liens est repéré par le titre « Plus de détails : .. » ; il s'agit de précisions apportées à un deuxième niveau de lecture.

2.6. LEXIQUE

Un lexique a été mis en place pour faciliter la lecture en ligne du texte des rubriques. Du fait que l'ensemble des paragraphes et informations abordés dans le site concerne un domaine très étendu de compétences (déchets, réglementation, physico-chimie, minéralogie, environnement, géotechnique, risques sanitaires, emplois en travaux publics....), il a paru judicieux de conférer à ce lexique les caractéristiques suivantes : accès simple, immédiat et définitions communes à l'ensemble des rubriques du site.

De ce fait, les mots identifiés dans le lexique sont surlignés en orange, comme le montre la figure 3 extraite d'un paragraphe de la rubrique MIOM. Quant à la définition ou l'explication du mot lui-même, elle apparaît directement au passage du curseur de la souris sur le mot, sous la forme d'une fenêtre sur fond jaune (ill. 5) et disparaît aussitôt une fois le mot passé. De cette manière, une telle fonctionnalité a permis aux spécialistes de rédiger avec précision une synthèse basée sur des éléments factuels liés au produit ainsi qu'aux disciplines scientifiques concernées. Dans le même temps; le non-spécialiste du produit ou de la discipline se voit offerte une possibilité de lecture « directe » et sans fournir l'effort d'ouvrir un dictionnaire.

Enfin, et ce n'est pas à négliger, dans un contexte tel que celui des déchets où le vocabulaire n'est pas nécessairement figé ou codifié, voire évolue en fonction de la normalisation ou réglementation européenne avec un délai d'application en France de plusieurs mois, le lexique peut apporter une aide précieuse. Il peut notamment permettre de gérer des « transitions » entre ancien et nouveau vocabulaire. Citons à titre d'exemple un changement de nomenclature ou de désignation du type de déchets devenus « dangereux » ou « non-dangereux » ou bien encore dans le cas des MIOM le mot « Mâturé » utilisé par la profession. Ainsi, c'est un outil de clarification d'utilisation simple, qui est validé suite à une discussion à l'échelle de l'ensemble des acteurs du site.

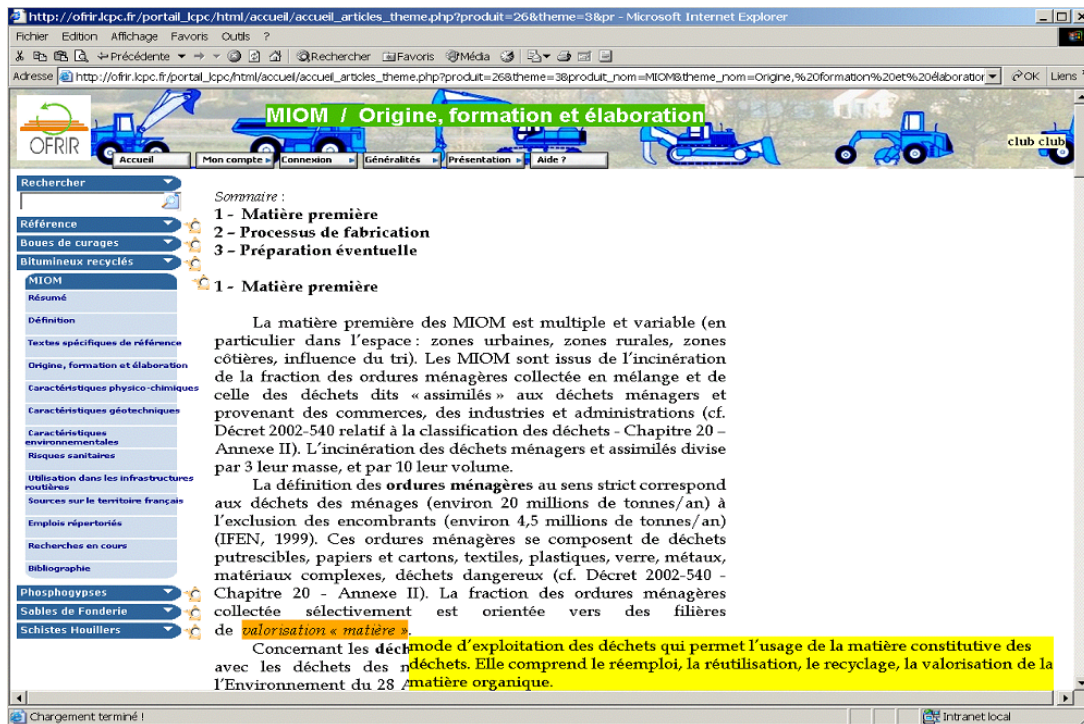


Illustration 5 - Exemple de contenu d'une rubrique produit du site OFRIR avec mot de lexique (le lexique est un dictionnaire spécifique à Ofrir). Cas des MIOM.

2.7. VALIDATION DE DONNÉES ET INTÉGRATION DE NOUVELLES DONNÉES, PRINCIPE

Le principe même de la validation des données et de l'intégration de nouvelles données dans la base OFRIR peut s'expliquer ainsi : toute donnée ou nouvelle donnée à intégrer au site suit une procédure d'instruction qui s'applique à l'ensemble des documents. Chaque donnée est, par construction de la base, rattachée à un produit, qu'il s'agisse du contenu des rubriques ou des données géographiques.

L'illustration 6 présente le réseau d'acteurs impliqués dans le fonctionnement de l'observatoire OFRIR en régime établi. Ces acteurs contribuent avant la mise en ligne d'une donnée. Quant au principe d'instruction d'une nouvelle donnée en vue de sa mise en ligne, il est le suivant :

- une nouvelle donnée qui arrive (club d'échanges) est soumise au responsable produit concerné qui décide le cas échéant de la mettre dans le circuit d'instruction, et formule des commentaires éventuels pour en souligner les spécificités ;
- les responsables thématiques donnent ensuite un avis d'expert sur cette donnée dans leur domaine respectif (géotechnique, matériaux-environnement, ouvrages-environnement, terrassement, chaussées, hygiène et sécurité, traitement des déchets) ;

puis, après modifications éventuelles, les responsables de l'observatoire révisent la version qui est ensuite soumise au comité de pilotage avant publication sur le site.

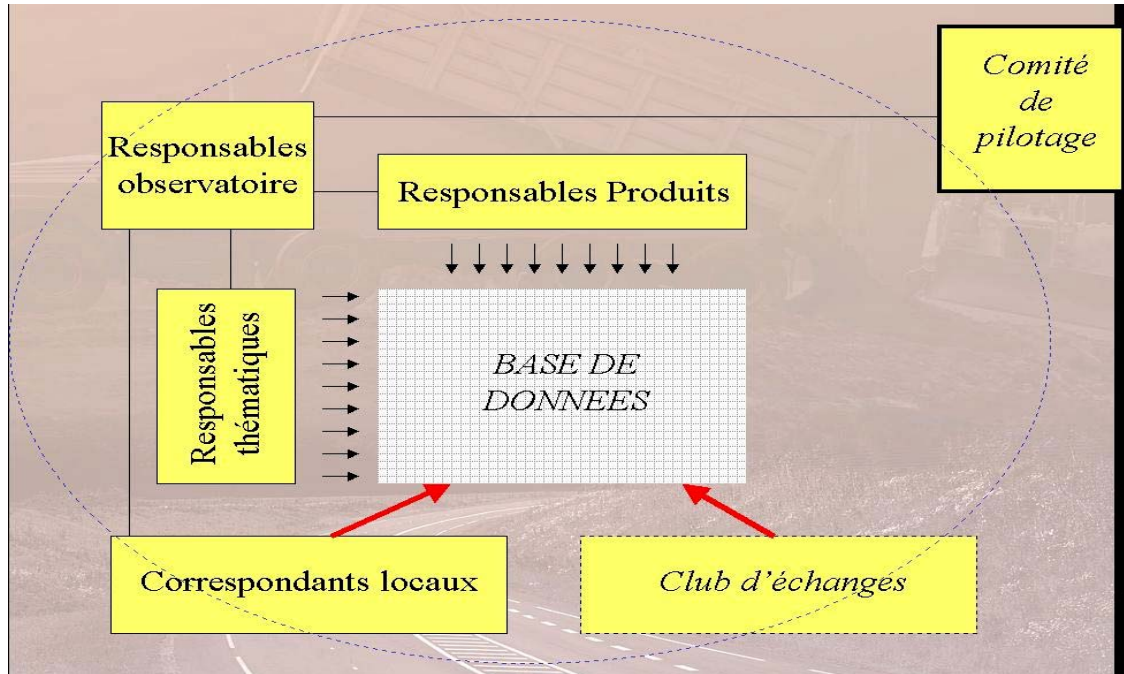


Illustration 6 - Principe de fonctionnement de l'observatoire OFRIR.

3. Action du BRGM dans le cadre d'Ofrir en 2004

Dans le cadre du projet OFRIR, le BRGM a assuré une dernière relecture de toutes les rubriques disponibles, ainsi que la validation des documents joints. Pour assurer la correction toutes les pages du site ont été reprises sous document word et corrigées avec la procédure de suivi des corrections. Des remarques de nature éditoriale et de fond ont été jointes par inclusion de notes. L'illustration 7 fait la synthèse des suggestions proposées et faites remarques.

Titre de la rubrique	Corrections proposées*	Remarques de fond
Références	<i>Exemple d'extraction</i> (au front) à remplacer par (le front de taille) <i>Différentes classes granulaires</i> Mettre une majuscule au départ. <i>Mesure des propriétés</i> Un petit problème de police dans le texte du troisième pavé.	L'utilisation des deux points doit être revue de manière rigoureuse. La bibliographie doit être homogénéisée et la même pour tous les dossiers du site.
Manuel d'utilisation		Pas disponible en ligne
Matériaux de démolition	Éviter de mettre des crochets à la place des parenthèses pour la bibliographie citée	La bibliographie doit être mise à des normes communes à toutes les fiches
Boues de curage	<i>Tableau 4</i> , une référence bibliographique non consignée dans la bibliographie générale. La numérotation des tableaux doit être faite en chiffre arabe comme pour les autres dossiers.	Le premier problème que je vois dans ce texte c'est que le Valorisable® est cité 20 fois pour 16 pages de texte ! N'est-ce point trop ? Est-ce une norme ou les Valeurs des VDSS de l'ESR français ? Si c'est les VDSS, il faut les abandonner! Elles n'existent plus! La bibliographie doit être mise à des normes communes à toutes les fiches.
Les matériaux bitumineux recyclés	<i>Résumé sur la gestion des agrégats</i> revoir la qualité de l'organigramme. <i>Centrale type</i> « La plupart des particules solides proviennent des granulats » Phrase paradoxale à reformuler ! <i>Organisation des études préalables</i> CCGT mettre au glossaire Le cas général Le cas particulier où	Détail amiante : je me demande si le site de Jussieu n'est pas un peu trop polémique, problème de neutralité. Norme m ³ , glossaire et préciser les conditions de calcul! Réhomogénéisation de la biblio par rapport à une norme commune à tous les autres dossiers. Page 16, Liens à éviter qui ne sont pas toujours disponibles!

Titre de la rubrique	Corrections proposées*	Remarques de fond
Déchets d'exploitation de route	Pas disponible	
Cendres volantes	Éviter de mettre des crochets à la place des parenthèses pour la bibliographie citée.	La bibliographie doit être mise à des normes communes à toutes les fiches
Déchets miniers	<p><i>Schéma d'exploitation</i> Revoir qualité de l'image</p> <p><i>Types d'exploitations</i> Lorsqu'un gisement est peu profond et à faible teneur</p> <p><i>Minéraux éléments traces</i> Tableaux à réorganiser</p> <p><i>Minerais exploités</i> Tableaux à réorganiser</p>	<p>Envoyer sur le site DMA du BRGM</p> <p>Revoir la bibliographie en fonction de normes communes pour tous les dossiers</p>
Laitiers de hauts fourneaux	<p>« ...courant ascendant de dioxyde de carbone (CO₂) :</p> <p>La règle d'utilisation des deux points : plusieurs phases avec un point implique une majuscule dès la première phrase. Si on met pas de majuscule on met point virgule (phrase longue avec ou sans verbe). Phares très courte une virgule simplement.</p>	<p>Pour le schéma de haut-fourneau, revoir la qualité d'image, séparer gangue de détermine, corriger phrase : « Ainsi, le laitier est un verre constitué de la gangue ... ». Le laitier provient de la fusion de la gangue qui correspond à la partie stérile du minerai, le fondant ayant pour rôle par réaction chimique de faciliter la fusion. Il n'y a rien de catalytique là dedans. Granulé, bouleté, grenailier, homogénéiser pour tout les texte sur les laitiers et mettre dans un glossaire.</p>
Laitiers d'aciérie	<p><i>Différents dosages de la chaux</i> (corriger le titre de la feuille) : séparer déterminer de les (deux fois)</p> <p><i>Description essais vapeur</i> : Préparation de l'échantillon changer police</p>	<p>Remarque sur la commission RPT, à modérer en fonction de l'absence d'évolution du dossier ! Plus de commission, plus de projet véritable de réglementation, seulement un guide !</p> <p>Revoir la bibliographie pour homogénéiser tout sur un même style, et cela pour toutes les fiches</p>
Laitiers de non ferreux		<p>Fiche procédure de lixiviation enlever (replace la XP 31-210)</p> <p>Respecter la règle des deux point déjà donnée et en plus on n'a pas le droit de mettre deux points après deux points. Homogénéiser la bibliographie</p>

Titre de la rubrique	Corrections proposées*	Remarques de fond
Matériaux de carrière		Non disponible
Matériaux naturels avec M.O.		Non disponible au moment des corrections reste à faire
MIOM		La bibliographie doit être mise à des normes communes à toutes les fiches.
Phosphogypses	<p><i>Activité radioactive :</i> Émission d'un rayonnement par un noyau</p> <p><i>Graves activées soude :</i> non graves activées soude</p> <p>Risque de développement de cancer</p> <p><i>Risque sanitaire agriculture</i> « et les personnes s'installant sur ces terres après qu'elles ont aient perdu</p>	<p>Ce texte qui semble le plus fourni du site OFRIR souffre d'un certain nombre de handicaps, de nombreuses redites sont présentes dans le texte et certaines ces dernières ressemblent à s'y méprendre à des coupés collés. En outre certaines définitions sont très approximatives peut être par souci de faire simple. En conclusion ce texte nécessite encore un effort de synthèse pour le rendre plus agréable à la lecture. Ensuite pour une application route est-il nécessaire de parler agriculture ?</p> <p>Valorisation comme régulateur : Une usine de fabrication de ciment à partir du phosphogypse fonctionne toujours à la <i>Palabora</i> (Afrique du sud, carbonatite à phosphore et niobium), son principe régénérer l'acide sulfurique par réduction par du coke et par ajout de silicates produire des clinkers servant de base pour la formulation des ciments.</p> <p>Bibliographie Que ce soit dans le texte comme dans la liste des références, revoir la bibliographie en fonction de normes communes pour tous les dossiers !</p>

Titre de la rubrique	Corrections proposées*	Remarques de fond
Pneus		Décret 2002-1563, Pas d'accès au PDF. Problème d'homogénéisation des références bibliographiques par rapport à un modèle utilisé pour tous les dossiers.
Sables de fonderie		Comment peut-on différencier les caractères plus ou moins réfractaires des argiles ? Doit-on en dire plus ou éviter la formulation de la phrase pour éviter toute ambiguïté ? Le terme Bentonite est très précis et ne peut pas être un mélange, dans ce cas on parle de mélange argileux à composante bentonitique majeure. Problème d'homogénéisation des références bibliographiques par rapport à un modèle utilisé pour tout les dossiers
Schistes houillers		Genèse du charbon en France Concernant la genèse du charbon je ne pense pas que le bassin de Gardanne-Fuveau qui produit du lignite soit d'âge carbonifère, je dirais tout au plus tertiaire et peut être oligocène à vérifier ! NF P11-300 Lien hypertexte ne marchant pas !

*Illustration 7 - Exemples de corrections majeures.
Pour le reste* voir les corrections au fil du texte dans les annexes.*

Des exemples de correction types sont joints en annexes.

Annexe 1

Laitiers d'aciérie

Avertissement :

Différents dosage de la chaux (corriger le titre de la feuille) :

séparer déterminer de les (deux fois)

Description essais vapeur :

Préparation de l'échantillon changer police.

Laitier d'aciérie

Résumé

L'acier peut être produit selon deux filières d'élaboration, qui génèrent des co-produits appelés laitiers d'aciérie. La filière convertisseurs à oxygène permet l'élaboration d'acier à partir de la fonte, le laitier qui en résulte (BOF : Basic Oxygen Furnaste Slag) est communément appelé "laitier LD Linz-Donowitz avec l'affinage à l'oxygène par le haut du convertisseur" et "laitier LWS Loire-Wendel-Sprunck, avec l'affinage à l'oxygène par le fond du convertisseur". La filière four électrique permet l'élaboration d'acier à partir de ferrailles essentiellement en générant un co-produit communément appelé laitier d'aciérie électrique ou EAF.

Selon [le décret 2002-540](#) du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE) aujourd'hui MEDD (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable) [NC11] relatif à la classification des déchets, les laitiers d'aciéries sont classés comme déchets non dangereux provenant de procédés thermiques; et ne sont donc pas des DIS. Des normes techniques européennes, en cours d'élaboration, permettront notamment d'en préciser les usages.

Le rôle des laitiers générés par les deux processus précités, consiste à piéger les éléments indésirables à la production d'acier de qualité ; ce sont ces éléments qui vont conférer des propriétés particulières aux laitiers. Le laitier en fusion refroidi à l'air présente des caractéristiques de dureté intéressantes ; tandis que sa densité est plus élevée que celle des roches naturelles. Les caractéristiques géotechniques des laitiers d'aciérie en font un excellent granulats pour les couches de roulement. Par contre, l'instabilité volumique possible des laitiers de convertisseurs à oxygène, exige des traitements particuliers ou en limite l'utilisation à des domaines d'emploi en travaux publics où les exigences de stabilité volumique ne sont pas essentielles : remblais, matériaux drainants, graves non traitées.

La production moyenne annuelle de laitiers d'aciérie est de 1 100 000 tonnes pour la filière convertisseur à oxygène (à proximité des trois grands pôles sidérurgiques Fos/mer, Dunkerque et en Lorraine) et de 800 000 tonnes pour la filière électrique (plus dispersée sur le territoire français). L'utilisation, pouvant être délicate et assez peu répandue des laitiers de convertisseurs à oxygène, a conduit à la constitution de stocks importants sur certains sites et des études sont en cours, en particulier avec le CTPL et le LCPC pour en améliorer la stabilité.

Définition

Les laitiers d'aciérie sont des co-produits de l'élaboration de l'acier. Selon la filière d'élaboration, on distingue:

- les laitiers issus de convertisseur à oxygène transformant la fonte, venant d'un haut-fourneau, en acier ; on parle alors couramment de laitiers LD (ou scories LD) recouvrant en fait sous ce terme générique des laitiers LD, LWS et OBM[NC12],
- les laitiers d'aciérie électrique, obtenus lors de la fabrication de l'acier, essentiellement à partir de ferrailles.

Les constituants majeurs et les impuretés de ces produits sont fonction de la matière première utilisée (fonte, ferraille,...) du type d'acier recherché mais aussi des adjuvants rajoutés au cours du processus de fabrication (chaux, magnésie, ...). On pourra alors constater des variations dans la composition chimique de ces laitiers.

Il est important de noter dès à présent que, selon la filière d'élaboration de l'acier, le laitier peut avoir des caractéristiques différentes: les laitiers d'aciérie électrique ont en général moins de problème de stabilité volumique (évolution granulométrique, gonflement) que les laitiers de convertisseur à oxygène

L'affinage de l'acier par traitement en poches génère d'autres laitiers en quantité moindre, communément appelés "scories de cuvier". Il ne faut pas les confondre avec les laitiers d'aciérie. C'est pourquoi, pour ces derniers, l'appellation "scories" est impropre et génératrice de confusions. Des études approfondies sont indispensables pour les valoriser.

Textes spécifiques de référence

Sommaire

1. Projets de normes européennes
2. Normes françaises
3. Codification du déchet
4. Autres documents existants et expériences étrangères

1. Projets de normes européennes

En ce qui concerne l'ensemble des granulats (naturels, de recyclage et de source industrielle - comme les laitiers d'aciérie -), la norme française XP P 18-540 est remplacée par un ensemble de normes européennes « Granulats », alliées à une nouvelle norme française : XP P 18-545 Février 2004

Les laitiers sidérurgiques (cristallisés de haut fourneau, d'aciérie de conversion et d'aciérie électrique) seront couverts en tant que tels par les normes européennes « Granulats » et feront l'objet, pour certains usages, de caractérisations spécifiques (la stabilité volumique des laitiers d'aciérie de conversion par exemple).

Plus de détails : [projets de normes](#)

2. Normes françaises

On se référera aux normes suivantes:

-NF P 11-300 « Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructure routière », rubrique sols matériaux rocheux et granulats naturels.

Les sous produits industriels, ainsi que les sols organiques sont classés sous la rubrique F dans cette norme. Pourtant les laitiers d'aciéries ne sont pas inscrits dans une sous classe bien définie, contrairement aux laitiers de haut-fourneau qui se retrouvent dans une classe (F₈). En fait, les laitiers d'aciérie sont à classer sous F₉, c'est à dire « autres sous-produits industriels ». Or, pour cette classe de matériaux, très vaste, les paramètres considérés comme significatifs ne sont pas donnés : ils sont à définir au cas par cas, à l'aide d'une étude spécifique. C'est le genre d'informations que l'on peut trouver dans un Guide Technique Régional.

-Norme XP P 18 540 « Granulats Définitions, conformité, spécifications »

Cette norme référence pour les différents domaines d'emploi des granulats dans les chaussées, bétons hydrauliques et ouvrages ferroviaires^[NCI3].

Elle permet de classer les laitiers d'aciérie, ainsi que tous les autres granulats, par rapport à des catégories de caractéristiques intrinsèques (résistance au choc LA, résistance à l'attrition MDE, ..) et de caractéristiques de fabrication (granulométrie, propreté,..). Elle ne prend pas en compte d'autres critères, comme par exemple celui de la stabilité volumique. Elle est remplacée par la XP P 18-545 (cf. ci-dessus)

3. Codification du déchet

Les laitiers d'aciérie sont des "déchets provenant de procédés thermiques"; ils ne sont pas classés comme déchets dangereux. Ils ne sont ni *DIS*, ni même des *DIB* et dans de nombreux cas, après élaboration, ce sont des produits normalisés.

4. Autres documents de référence existants et expériences étrangères en France et à l'étranger

Les autres documents existants, comme par exemple le guide pour les terrassements routiers (GTR) ou les notes du SETRA, ne font pas référence à ce type de matériau, car ces derniers sont souvent stockés et assez peu utilisés à ce jour en techniques routières. Bien que ce document n'ait pas de portée en France, il faut signaler la circulaire du Ministère Belge de l'aménagement AWA/178-95/150 appliquée en Wallonie. Un chapitre y est entièrement consacré aux conditions d'emploi des laitiers d'aciérie de conversion. On retiendra que des règles de limitation du gonflement, et dans certains cas, du délitement, sont proposées selon l'utilisation. Par ailleurs, leur emploi est exclu dans tous les mélanges traités aux liants hydrauliques.

De même, en Allemagne, il faut pour une utilisation en structure de chaussée qu'un granulat de laitier de convertisseur à oxygène ne présente pas d'instabilité volumique (test à la vapeur)
-supérieure à 5% de son volume initial pour une utilisation en couche de base ou de fondation,
- supérieure à 3% de son volume initial pour une utilisation en couche de roulement. (Boudonnet J.Y., CTPL, 1996), et NF EN 1741.1 septembre 1998.

Cette restriction d'emploi des granulats de laitier de convertisseur est également, à ce jour, préconisée par les producteurs français (source CTPL). En revanche, elle ne s'applique pas aux laitiers d'aciérie électrique (dont les taux de chaux libre sont bien inférieurs).

Origine, formation et élaboration

1. Origine
2. Formation
3. Élaboration : filière convertisseurs à oxygène ou électrique

1. Origine

Plus de détails : [filière de production de l'acier](#)

1.1 Filière " convertisseurs à oxygène " ou filière " intégrée " ou dite "à chaud "

Le laitier de convertisseur à oxygène est issu de la fabrication d'acier à partir de minerai de fer. Cette filière de fabrication de l'acier se fait en deux temps, dans le haut-fourneau, puis à l'aciérie. Tout d'abord, le minerai de fer est réduit par du coke dans un haut-fourneau pour donner de la fonte. Cette dernière est affinée (soufflage d'oxygène) par oxydation du carbone dans un convertisseur d'où sort l'acier. Ce dernier est alors laminé à chaud ou à froid pour donner des produits longs (rails...) ou plats (tôles...). Le laitier de convertisseur à oxygène est issu de la deuxième partie du processus de formation de l'acier, c'est à dire de la transformation de la fonte en acier (affinage).

Plus de détails : [schéma convertisseur à oxygène](#)

1.2 Filière électrique

Le four électrique à arcs permet la fabrication d'acier à partir d'une charge constituée essentiellement de ferrailles de récupération sélectionnées (copeaux d'usinage, ferrailles broyées, ferrailles de démolitions, rebuts de production sidérurgiques, etc.). Selon les usines, de la fonte peut être ajoutée à la ferraille.

Plus de détails : [Four aciérie électrique Unimétal de Gandrange](#)

2. Formation

2.1. Filière "convertisseurs à oxygène" ou de conversion

La transformation de la fonte en acier, appelée affinage ou encore conversion, s'effectue par oxydation des éléments dissous dans le fer liquide, ces derniers ayant la propriété d'être plus facilement oxydables que le fer. Cette opération a été pratiquée dès l'antiquité, par martelage des produits solides à l'air, puis, depuis Bessemer, par mise en contact de la fonte liquide avec un gaz oxydant (air dans les temps anciens, oxygène pur dans les procédés modernes).

On peut ainsi transformer la fonte liquide en acier liquide en assurant simultanément l'élimination de C, Si, Mn, P et S et l'élévation de température nécessaire pour passer de la fonte liquide (1250° en moyenne) à l'acier liquide (1600° en moyenne).

Lors de cette phase, de la chaux est introduite dans le convertisseur. Cette chaux joue un rôle très important dans l'oxydation des composés. En effet, les composés « parasites » ont une affinité plus ou moins marquée pour l'oxygène. La chaux sert donc à mieux fixer dans le laitier les éléments parasites pour l'acier et ainsi, obtenir un acier plus pur. Ensuite, la chaux permet de protéger les briques réfractaires constituées de magnésie présentes dans le convertisseur. En effet, à cause de l'acidité du laitier venant de la silice, ces briques s'érodent : le magnésium est consommé et se retrouve dans le laitier. Pour éviter cette usure et ne pas consommer trop de briques, de la chaux magnésienne est [\[NC14\]](#) injectée dans le convertisseur, ce qui permet de réduire l'acidité du laitier.

Les oxydes produits contribuent, avec la chaux introduite, à la formation d'un laitier de densité plus faible que le métal liquide, qui surnage. Le laitier, après soutirage, est ensuite refroidi. Ce refroidissement se fait en masse, généralement à l'air libre, dans des fosses. Mais il peut également se faire par voie humide, dans des bassins d'eau ou par aspersion [\(grenailage ?\)](#).

2.2. Filière électrique

Additionnés à la ferraille, des réactifs spécifiques, voire de la chaux vive, mais en quantité moins importante que pour les laitiers de convertisseurs à oxygène, peuvent être introduits également dans le four. Ces réactifs permettent une meilleure oxydation des éléments « parasites » se trouvant dans la matière première. Après fusion des éléments introduits dans le four, le laitier contenant les oxydes, plus léger surnage au-dessus du métal. Cette différence de densité permet de séparer l'acier du laitier au moyen d'un système de goulottes. Le laitier est dirigé vers une fosse pour y être refroidi, le refroidissement étant accéléré par un arrosage à l'eau. Après solidification partielle, le laitier est ensuite évacué vers une zone de stockage durant 6 mois où il sera alors élaboré pour une utilisation en TP (Figures 1 et 2).



Figure 1 : extraction de laitier électrique site d'Hagondange.



Figure 2 : stock de laitier électrique brut site COGESUD.

3. Élaboration : filière "convertisseurs à oxygène" ou électrique

Les laitiers issus de convertisseurs à oxygène ou les laitiers électriques contiennent en général une quantité non négligeable de fer ; le déferrailage constitue une étape indispensable dans l'élaboration du laitier . Une grande partie de ce fer peut être valorisée pour être réinjectée directement dans la filière d'élaboration. Les plus gros morceaux de ferraille, pouvant atteindre une tonne environ, sont enlevés par l'aciériste. Le laitier restant à l'issue de cette première opération de déferrailage est ensuite criblé sur une grille et passé sur un over band (un exemple est donné en figure 3). Ceci permet d'en sortir les « scraps » [\[NC15\]](#)d'aciers. Ces derniers peuvent être envoyés directement en aciérie ou concassés. Selon la granularité, ils sont envoyés, après stockage soit en aciérie (*riblons* de 50/400 [\[NC16\]](#)) soit en haut-fourneau (*riblons* de 10/50 ou concentrés de 0/10).Le laitier fait ensuite l'objet d'un criblage/concassage pour obtenir une granularité adaptée à son utilisation (Figure 4). Le passant de cette grille subit un dernier tri magnétique et granulaire qui permet de récupérer au maximum le fer. Le poids des produits de déferrailage représente environ 30 % de l'ensemble des laitiers qui quitte l'aciérie (Alexandre J, Boudonnet J.Y., 1993).



Figure 3 : Site d'élaboration des laitiers de convertisseurs à oxygène de Schoeneck



Figure 4 : Stock de laitiers de conversion 0/31.5 de Schoeneck

Le laitier dé-ferraillé peut ensuite être, selon son origine et selon la demande :

- utilisé en amendement agricole ;
- utilisé en technique routière (remblai, couche de forme, matériaux drainant, granulats dans des couches bitumineuses).

Un exemple de processus d'élaboration est schématisé en figure 5 :

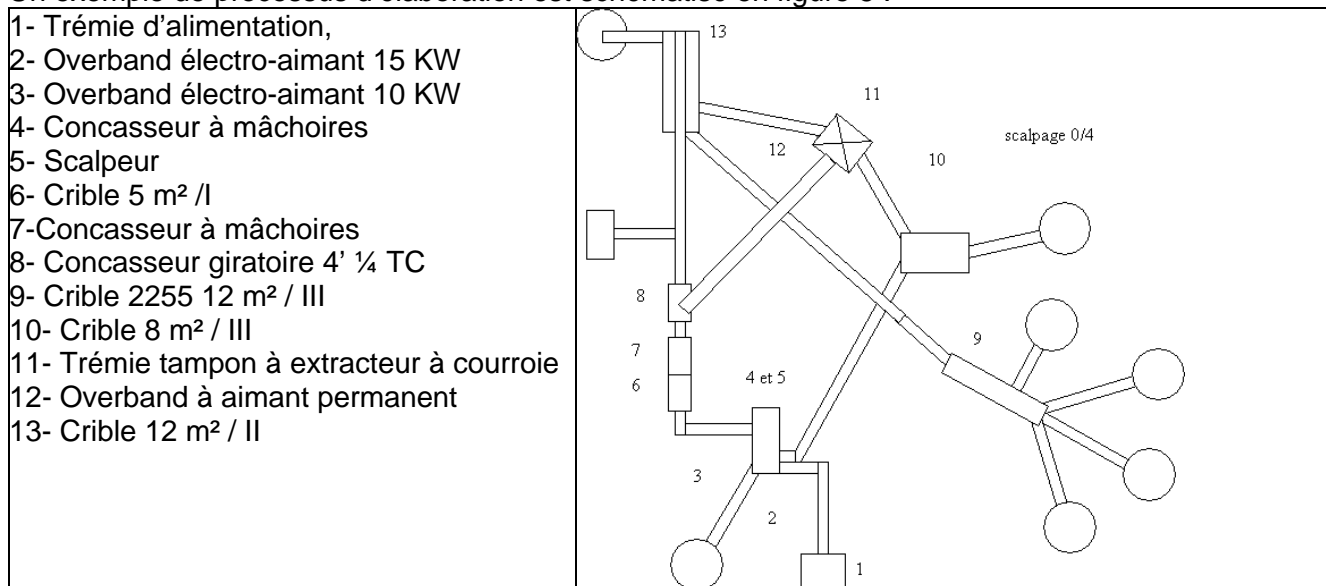


Figure 5 : élaboration du laitier COGESUD

Plus de détails : [vue générale d'une Centrale de criblage, concassage de laitiers](#)

3.1. Elaboration du laitier de "convertisseur à oxygène "

En France, SOLLAC (ARCELOR) élabore les laitiers de convertisseurs à oxygène sur différents sites: Florange en lorraine, Dunkerque et ~~Fos/mer~~ Fos-sur-Mer, qui représentent 100% de la production française de ces laitiers.

En Allemagne, les laitiers de convertisseurs à oxygène sont des produits réalisés exclusivement à partir de laitiers de fraîche production de Völklingen entre Saarlouis et Saarbrücken selon le procédé « Lintz-Donawitz ». Le laitier est refroidi, déferraillé et analysé sur le site. En fonction du résultat des analyses chimiques, une maturation pouvant durer plusieurs mois pourra être appliquée. Les granulats seront alors élaborés dans l'installation de concassage criblage de Schoeneck entre Forbach et Saarebrücken exploitée par la société Eurogranulats. Les granulométries qui résultent de l'élaboration de ce laitier sont les suivantes : 0/150 et 0/25 traités; 10/35 et 20/100 pour les matériaux drainants.

3.2. Élaboration du laitier électrique

Selon les usines, les procédés d'élaboration diffèrent, tout en comportant des phases de : refroidissement, mise en stock pour maturation avec ou sans arrosage, puis concassage criblage. Nous donnons ci-dessous quelques exemples:

· **Laitier électrique (LAFE)** [NCI7] d'Hagondange, en Moselle, par Eurogranulats de Hauconcourt
Les laitiers LAFE, exclusivement de fraîche production, sont issus de l'élaboration des aciers de Ascométal à Hagondange. Dans l'attente de son élaboration (environ 6 mois) le laitier est mis en dépôt dans l'enceinte de l'usine. (brevet français et européen n°0539287 [NCI8]) Les granulométries qui résultent de l'élaboration de ce laitier sont les suivantes : 0/100 ; 0/80 ; 0/10 ; 10/35.

· **Laitiers électrique « Granulac » (Procédé COGESUD)**

Ce sont des matériaux élaborés exclusivement à partir de laitiers de fraîche production, après avoir été stockés durant 6 mois. Les granulométries qui résultent de l'élaboration de ce laitier sont les suivantes : 0/4 ; 4/6 ; 6/10 ; 10/14. A ce jour, des études sont en cours pour la valorisation de la fraction 0/4 excédentaire.

· **Laitier électrique E.A.F** [NCI9] usine ISPAT UNIMETAL de Gandrange en Moselle

Ce nouveau matériau est élaboré-;

* ~~d'une D'une~~ part par la Société Lorraine d'Agrégats. (S.L.A.G) à Thionville (SLAG Lorraine 2001). Après avoir été arrosé et refroidi dans des bacs, le laitier est transporté pour être stocké environ 12 mois sur les sites de Nilvange et de Moyeuve où il sera ensuite élaboré. Les granulométries qui résultent de l'élaboration de ce laitier sont les suivantes : 0/4 ; 4/6,3 ; 6,3/10 ; 10/14. Ces laitiers sont essentiellement utilisés en couche de roulement en enduits superficiels.

* ~~d'autre D'autre~~ part par la société SOCOMAN PROCATRA à Montois la Montagne. ~~Le où le~~ laitier brut est repris en sortie de four pour être refroidi par arrosage et stocké en fosse. ~~Le laitier~~ II sera alors criblé, ~~dé-ferraillé~~ dé-ferraillé et concassé sous forme de 0/31.5 et 31.5/D et sera stocké environ 6 mois pour sa maturation sur le site de Gandrange. La valorisation de ces matériaux de granulométrie 0/4; 4/6; 6/10 et 10/14 est à l'étude.

Caractéristiques physico-chimiques

Sommaire

1. Composition chimique élémentaire
2. Caractéristiques minéralogiques
3. Instabilité volumique
4. Méthodes pour diminuer l'instabilité volumique

1.1. Composition chimique élémentaire

La représentation triangulaire, figure 6, permet de schématiser les positions relatives des domaines de composition pour ces matériaux en prenant pour référence CaO - SiO₂ et Al₂O₃. Les laitiers électriques se situent en partie haute de la représentation 5.

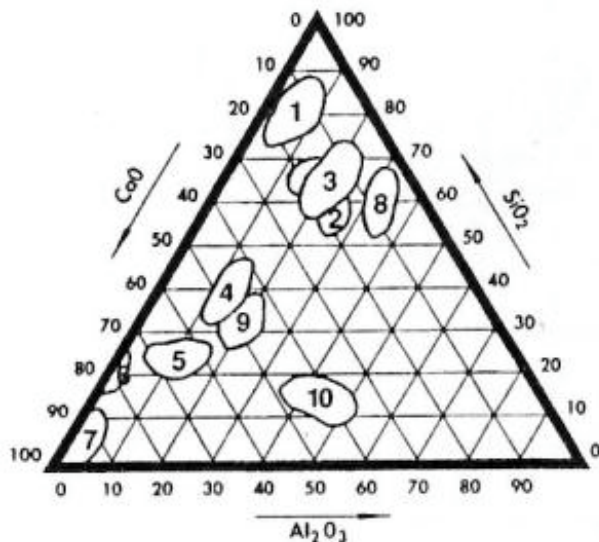


Figure 6 : Diagramme triangulaire CaO - SiO₂ et Al₂O₃
(Boudonnet J.Y., CTPL, 1994)

- 1- Verres
- 2- Basaltes
- 3- Pouzzolanes
- 4- Laitier H F
- 5- Clinker Portland
- 6- Laitier de conversion
- 7- Chaux
- 8- Cendres silico-alumineuses
- 9- Cendres sulfo-calciques
- 10- Ciments alumineux

1.2. Analyses chimiques

Les résultats des analyses des laitiers diffèrent très sensiblement d'une usine à l'autre du fait de la variété des fontes traitées et des techniques d'affinage. Le tableau 2 ci-dessous donne donc une synthèse de la fourchette des valeurs habituellement obtenues pour les laitiers de convertisseur à oxygène et électriques.

Constituants	Teneur en %	Teneur en %
	laitier convertisseurs à oxygènes (Alexandre et Boudonnet , CTPL, 1993)	Laitiers électriques Gandrange (S.L.A.G, 2001)
Fe _{tot.} (Fer total)	20-25	19 à 32
SiO ₂ (oxyde de silicium)	10-15	9 à 20
CaO (oxyde de calcium ou chaux)	40-45	32 à 43
MnO (oxyde de manganèse)	5-7	2 à 7
MgO (oxyde de magnésium)	2-8	2 à 7
P ₂ O ₅ (pentoxyde de phosphore)	2-3	0.5 à 2
Al ₂ O ₃ (oxyde d'aluminium)	1-2	2 à 6
Cr ₂ O ₃ (oxyde de chrome)	0,1-0,3	
S (soufre)	0,05	<0.4
CaO libre (chaux libre)	2-10	< 1 [NCI10]

Tableau 2 : Éléments composants les laitiers de convertisseur à oxygène et électriques

Les analyses chimiques montrent que les éléments majeurs sont représentés par le fer, le calcium, le silicium et dans une moindre mesure par l'aluminium, le magnésium et le manganèse.

2. Caractéristiques minéralogiques

2.1 Filière convertisseurs à oxygène

La structure et la composition minéralogique du laitier sont assez hétérogènes selon le procédé utilisé et sa conduite. Mais en raison des conditions de pressions et de températures mises en jeu et de la nature toujours identique des composés majeurs utilisés, la variabilité des phases minérales obtenues est limitée à quelques espèces (Boudonnet, 1994) :

- la *bélite* (C_2S) ou silicate bicalcique (Ca_2SiO_4) contenant en solution solide du phosphate tricalcique C_3P^* qui se substitue au silicium (Ca_3PO_7) ;
- l'*alite* (C_3S) qui est un silicate tricalcique (Ca_3SiO_5) ;
- les ferrites de calcium, principalement C_2F^* , très stables et contenant en solution solide l'alumine de l'aluminium, du chrome, du vanadium ($Ca_2Fe_2O_5$) ;
- les solutions solides à base d'oxydes et de manganèses de type (FeO, MnO, CaO, MgO).
- La chaux libre CaO, donnant par hydratation de l'hydroxyde de calcium ou portlandite $Ca(OH)_2$ et du carbonate de calcium [$CaCO_3$] après piégeage du CO_2 de l'atmosphère ;
- l'oxyde de magnésium sous forme de périclase [MgO], donnant sur les laitiers vieilliss de la brucite [$Mg(OH)_2$] susceptible de se carbonater en magnésite [$MgCO_3$].

2.2. Filière électrique

Selon l'origine des laitiers, l'étude minéralogique fait apparaître des composés de type silicate bi-calcique et aluminosilicates de calcium, associés à des oxydes de fer et des oxydes de la famille des spinelles et des ferrites de calcium.

Le taux de chaux libre résiduelle CaO + $Ca(OH)_2$ exprimé en équivalent CaO se situe aux alentours de 1% sur la fraction 0/20 mm du tout-venant (Détermination par la méthode LEDUC)

3. Instabilité volumique

L'instabilité volumique se traduit par deux phénomènes :

- l'évolution granulométrique du laitier par éclatement de certains grains.
- le gonflement du laitier en masse.

Les causes de l'instabilité volumique de laitiers de convertisseurs à oxygène se trouvent dans la présence de CaO (chaux libre) et de MgO (magnésie libre). Par contre, les laitiers électriques ne semblent pas sujets à cette instabilité.

Parler de la transformation de la bélite ?

3.1. L'oxyde de chaux de calcium [NC11]

La chaux L'oxyde de calcium peut se présenter sous différentes formes (Hornain, et al., 1995) :

Ø- oxyde de calcium combinée dans les silicates, alumino-ferrites et ferrites de calcium,

Ø- oxyde de calcium non combinée ou chaux libre. Ce composé, dispersé en inclusions de 1 à 10 μm dans le laitier, correspond à la forme expansive. L'expansion se produit lors de l'hydratation de ce composé suivant l'équation à cause du changement de volume induit par l'hydroxylation :



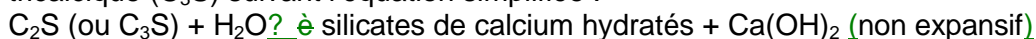
Symboles de la chimie des ciments:

*C= CaO *P= P_2O_5

*S= SiO_2 *F= Fe_2O_3

L'hydratation de la chaux libre s'accompagne d'une augmentation de "volume solide", d'où une expansion. Ce phénomène s'explique par une modification de la structure cristalline, la masse molaire augmente (de 56 g pour CaO à 74g pour $Ca(OH)_2$), alors que la masse volumique réelle du solide diminue (de 3.2 à 3.4 g/cm^3 pour CaO à 2.2 à 2.4 g/cm^3 pour $Ca(OH)_2$).

Ø-ØL'hydroxyde de calcium libre résultant-résulte d'une part de l'hydratation du CaO libre (réaction expansive), d'autre part de l'hydrolyse du silicate bicalcique (C_2S) et du silicate tricalcique (C_3S) suivant l'équation simplifiée :



L'hydratation commence à se produire lorsque le laitier entre en contact avec l'eau au cours de sa mise en fosse.

Ø Le carbonate de calcium CaCO_3 résultant-résultat de la carbonatation de Ca(OH)_2 (provenant de l'hydratation la chaux libre) et des silicates de calcium hydratés (provenant de l'hydrolyse des silicates de calcium anhydres). La formation du carbonate de calcium n'est pas expansive. Le composé, très peu soluble, est pratiquement inerte.

Les laitiers peuvent contenir des quantités variables de CaO et de CaO libre dépendant du processus d'élaboration et de la qualité de la chaux introduite au départ. En ce qui concerne les laitiers de convertisseur à oxygène, la teneur en CaO libre peut quelquefois atteindre 12%.

Plus de détails : [différents essais de dosage de la chaux](#)

Globalement, la teneur en chaux libre résiduelle, ($\text{CaO} + \text{Ca(OH)}_2$), exprimée en CaO, mesurée selon la méthode LEDUC pour la plupart des laitiers d'aciéries électriques, est relativement faible et varie de 0,1 à 1,2 %. De plus, les tests effectués sur plusieurs laitiers électriques de différentes origines (Eurogranulats, LECES Environnement, SLAG) donnent des résultats satisfaisants par rapport à la stabilité volumique de ces matériaux.

Plus de détails : [description de l'essai d'expansion à la vapeur](#)

Toutefois, ces résultats étant fortement liés aux processus de production, il est indispensable de ne pas les généraliser et de vérifier si les seuils maximum autorisés ne sont pas dépassés.

3.2.L'oxyde de magnésium

L'oxyde de magnésium sous forme de périclase (MgO) peut être considéré comme une cause d'instabilité volumique des laitiers (Boudonnet, 1996). En effet, lorsque l'oxyde de magnésium s'hydrate, l'augmentation de volume qui en résulte peut, de la même manière que pour la chaux (voir paragraphe suivant), être préjudiciable à la stabilité volumique de l'ouvrage.

Cette augmentation de volume est d'ailleurs plus importante pour l'oxyde de magnésium (environ 1,3 fois) que celle consécutive à l'hydratation de la chaux. Mais l'hydratation de l'oxyde de magnésium est beaucoup plus lente.

En raison du processus d'obtention des laitiers de convertisseur à oxygène et de la nécessité d'injecter de la chaux magnésienne pour éviter l'usure des briques réfractaires, les laitiers de convertisseur à oxygène sont sujets à une instabilité dimensionnelle due au magnésium libre. Toutefois, les données concernant cette instabilité sont rares en raison de l'inexistence d'une méthode fiable permettant de mesurer la quantité de magnésium libre dans les laitiers.

Ainsi, le problème de l'hydratation du magnésium libre passe souvent au second plan, derrière les problèmes d'hydratation de la chaux libre.

4. Méthodes pour diminuer l'instabilité volumique

Les laitiers électriques ne présentent pas, a priori, de problème d'instabilité volumique. Ce paragraphe concerne donc essentiellement les laitiers de convertisseur à oxygène.

Usages français

En France, quand le laitier de convertisseur à oxygène est refroidi et solidifié, la pratique la plus connue pour éliminer le calcium libre, est d'une part, la préparation du granulats par concassage et criblage, et d'autre part, le vieillissement à l'air ambiant qui favorise l'hydratation et la carbonatation des éléments instables. Mais, pour accélérer la cinétique d'hydratation de la chaux et magnésie libres, le matériau soumis au vieillissement à l'air libre peut être arrosé. Ainsi, selon Alexandre J. et Boudonnet J.Y. (1993) l'expérience française dans ce domaine montre qu'un vieillissement à l'air libre permet d'abaisser la teneur en chaux libre et qu'un état de stabilité suffisant est obtenu plus facilement avec des laitiers titrant moins de 5 ou 6 % de chaux libre

Toutefois, il faut rappeler qu'il n'existe pas, à l'heure actuelle, de documents recommandant explicitement les domaines d'emploi possibles en fonction de la teneur en calcium libre ou de l'instabilité mesurée. Les futures normes européennes précitées se limitent à la définition de classe de stabilité volumique. Il appartiendra à chaque pays de définir des règles de choix de classes.

Une étude CTPL^[NCI12] sur l'hydratation des granulats de laitier de conversion à oxygène est en cours au LCPC^[NCI13] et devrait se conclure courant 2004.

Autres techniques

Outre l'abaissement de la granularité et le vieillissement à l'air libre, divers procédés existent pour diminuer l'instabilité volumique de ces laitiers. Certains de ces procédés sont décrits ci-après.

Vieillessement artificiel : ~~divers~~ Divers brevets reposant sur des procédés de traitement des laitiers par l'eau ou le dioxyde de carbone ~~semblent permettre~~ permettent de stabiliser le matériau.

Neutralisation de la chaux par les sels acides : ~~une~~ Une étude a été réalisée sur des laitiers de Florange en Moselle dont le procédé repose sur le principe selon lequel l'adjonction d'un réactif acide favoriserait la dégradation des matériaux basiques et permettrait donc l'accès au calcium libre. Cette étude montre que la neutralisation de la chaux a bien lieu, sous réserve d'utiliser de l'eau, comme agent de diffusion (Prin - Ferreira L. 2000).

Intervention sur le laitier chaud : ~~des~~ Des procédés agissant sur laitier encore chaud existent également. Ces procédés concernent soit le processus d'affinage de la fonte, où l'on remplace par exemple une partie de la chaux par de la bauxite, soit le refroidissement du laitier, lors duquel on asperge le laitier chaud (800 – 900°C) d'eau ou l'on effectue une granulation par refroidissement rapide par l'eau. Ces méthodes permettent de diminuer le temps de vieillissement ultérieur puisqu'une grande partie de l'hydratation de la chaux vive a déjà eu lieu lors du refroidissement.

Toutes ces méthodes présentent toutefois certains inconvénients. Les traitements sur laitiers refroidis sont relativement longs, manquent de souplesse (notamment pour le concassage qui limite les débouchés) et ne sont pas toujours fiables. Les traitements sur laitier chaud, qui sont plus rapides, demandent quant à eux du matériel et une quantité d'énergie importante, ce qui diminuera leur compétitivité sur le marché des granulats.

Ainsi, la stabilisation des laitiers de convertisseurs à oxygène fait encore l'objet de recherches d'amélioration.

Caractéristiques géotechniques

Une première spécificité des laitiers d'aciérie est leur masse volumique, qui est supérieure de 30% environ à celle des granulats naturels, et doit être prise en compte dans les calculs des quantités à transporter.

Une deuxième particularité est relative aux risques d'instabilité volumique provoqués par l'hydratation de la chaux ou de la magnésie qui peut être contenue en quantité excessive dans ces granulats.

Un essai normalisé permet de mesurer le potentiel d'instabilité d'un échantillon de laitiers. Il fait l'objet du § 19.3 de la norme NF EN 1744-1, 1998. Un flux de vapeur traverse 4,5 kg de laitier 0/20 compacté pendant 24 ou 168 h. Le gonflement est mesuré à l'aide d'un comparateur, et exprimé en %.

Les valeurs ainsi obtenues permettent le classement du laitier en vue d'une utilisation. A titre d'exemple la norme NF EN 13-242 (granulats pour matériaux de chaussées hydrauliques ou non traités) définit des classes avec les valeurs seuils d'expansion de 5% (classe V5), 7,5% (classe V7,5), et 10 % (classe V10 si inférieure, ou Vdéclarée si supérieure). En France aujourd'hui, l'expérience reste assez limitée et peu de documents de maîtrise d'œuvre font pour l'instant référence à ces classes. Cependant, il est considéré que la classe V5 n'entraîne pas de risque de désordre dans des conditions ordinaires d'utilisation des granulats.

Les autres caractéristiques intrinsèques des laitiers d'aciéries sont souvent relativement dispersées (comparativement à des matériaux d'origine naturelle), en raison notamment des fluctuations plus ou moins importantes du processus de fabrication de l'acier. Les fourchettes des valeurs présentées dans le tableau 6 sont établies pour des laitiers de convertisseurs à oxygènes et de filière électrique de fraîche production. Ces caractéristiques sont particulièrement intéressantes dans le domaine routier: à noter la résistance à l'usure (*MDE*), la résistance à la fragmentation (*L.A*) [\[NC114\]](#) et les coefficients de polissage accéléré (*C.P.A*) [\[NC115\]](#)

obtenus. Au sens des articles 7 et 8 de la norme Granulat XP P 18 540, 1997, les granulats de laitiers peuvent être classés en catégorie B, voire A au regard des niveaux de caractéristiques intrinsèques LA, MDE, CPA évalués, ce qui les prédestine à un usage en couches de chaussées, voire en couches de roulement. Les caractéristiques de fabrication quant à elles dépendent du fonctionnement des installations de concassage et criblage au même titre que varient celles des granulats naturels. On signalera cependant que ces matériaux peuvent avoir des valeurs de propreté superficielle au-delà de celles habituellement requises pour les gravillons, en raison des éléments fins issus du concassage qui ne sont pas éliminés lors du criblage. Un lavage peut alors s'avérer nécessaire pour certains usages comme les enduits superficiels.

Enfin, il faut rappeler que, comme pour tout granulat, les producteurs sont tenus de fournir à leurs clients, une fiche technique produit (FTP) ~~INC116 à leurs clients~~, indiquant les diverses caractéristiques des granulats et les variations de ces dernières.

Caractéristiques	Convertisseur à oxygène (Alexandre J., Boudonnet J.Y. (LRPC de Nancy fourchettes moyennes des résultats sur différents laitiers électriques) 1993)	Filière électrique (LRPC de Nancy fourchettes moyennes des résultats sur différents laitiers électriques)
Résistance à l'usure, en % (M.D.E.)	à 6 à 12	8 à 16
Résistance à la fragmentation, en % (L.A)	à 10 à 20	10 à 23
Masse volumique réelle	3,3 à 3,6 t/m ³	3,4 à 4,0 t/m ³
Coefficient de Polissage Accéléré (C.P.A.)	de 0,45 à 0,55	0,50 à 0,60

Tableau 6 : Caractéristiques intrinsèques des laitiers

Caractéristiques environnementales

Sommaire

1. Transferts vers l'eau

2. Transferts vers l'air

1. Transferts vers l'eau

Les différentes études recensées sur le comportement environnemental des laitiers d'aciérie sont regroupées dans le tableau 3. Il s'agit principalement d'essais de laboratoire (lixiviation, percolation, contact statique) et d'un test sur modèle réduit.

Le programme européen SESAR, dont la fin est prévue pour 2004, a pour objet d'améliorer les connaissances dans le domaine des laitiers (voir paragraphe recherches en cours).

Echelle du test	Nom du test	Conditions expérimentales	Référence
Laboratoire	Lixiviation norme	selon-norme XP 31 210 - aciérie électrique Hagondange - norme XP 31 210 - aciérie électrique Gandrange	IRH (1997) LECES (2001)
	Lixiviation variation du pH	avec- granulométrie : 95 % < 125 µm - pH = 7 (3h) puis pH = 4 (4h) utilisation de HNO ₃ - L/S = 100	Fallman A.-M. et Hartlen J. (1994)
	Lixiviation conditions oxydantes	en- granulométrie : 95 % < 125 µm - ajout de H ₂ O ₂ - pH = 7 (3h) puis pH = 4 (4h) utilisation de HNO ₃ - L/S = 100	
	Percolation ascendante	- pH = 4 (acide : HNO ₃) - L/S = 0,1/jour jusqu'à 4	
	Contact statique	- Granulométrie < 4 mm -24 h à pH = 4, 6, 8, 10 et 12 -L/S = 5	
Modèle réduit	Cases — <u>Casiers</u> lysimétriques *	- Taille lysimètre : 3 x 3 x 1,2 m ³ - Granulométrie < 300 mm - L/S = 0,001 à 1 - Précipitations naturelles - Durée : 10 mois	

Tableau 3 : liste des tests de relargage chimiques aqueux recensé sur les laitiers

Légende : L/S = rapport liquide sur solide

* Case-Casier lysimétrique

Chaque type de test apporte des informations différentes sur le transfert vers l'eau des composés chimiques issus des laitiers, et la synthèse des résultats doit permettre d'apporter des informations sur leur utilisation et les précautions éventuelles à prendre. L'étude de Fallman A.-M. et Hartlen J. (1994) cherche à comparer différents tests-essais [NC17] de relargages sur des laitiers d'aciérie ainsi que d'autres sous-produits. Elle montre que les tests de laboratoire mettent en œuvre des changements de paramètres significativement importants pour un temps d'expérience que l'on peut considérer très court par rapport à la durée de vie d'un ouvrage. Les effets de ces changements donnent des différences de relargages de l'ordre de 10 à 100 fois entre les tests. Les tests de laboratoire semblent plus appropriés pour déterminer les paramètres influents sur le relargage (pH, potentiel d'oxydo-réduction), tandis que les essais de terrain sont importants pour déterminer les effets d'autres facteurs tels que, par exemple, la *complexation* des composés sur la matière organique. Les auteurs concluent qu'un unique test ne peut en aucun cas donner une prédiction fiable.

Précisions sur les essais de lixiviation :

Le tableau 4 récapitule pour différentes espèces chimiques présentes dans les granulats issus de laitiers un résumé des tendances au relargage auxquelles on pourrait s'attendre, sur la base d'essais de lixiviation. Il présente également des résultats d'essai de lixiviation selon la norme NF X 31-210 et les compare aux seuils de détermination du critère « dangereux pour l'environnement » dit critère H14, sur éluat de lixiviation, du projet du Ministère en charge de l'Environnement de janvier 98

Référence	Fallman A-M. et Hartlen J. (1994)	IRH (1997)	LECES (2001)	MATE (1998)	
Test effectué	Lixiviation avec comportement à		Lixiviation norme XP 31 210		Critères d'écotoxicité procédure H14
	L'augmentation du degré d'oxydation	l'augmentation de l'acidité (pH 12 → 8)			
pH	Voir tableau 3		11,7	12,7	**
Composé Symbole / nom	tendances		valeurs (mg/L)		
Al / aluminium		↓	**	**	**
Ca / calcium	→		**	**	**
Fe / fer	↓	→	**	**	**
K / potassium	→	→	**	**	**
Mg / magnésium	→		**	**	**
Na / sodium	→	**	**	**	**
S / soufre	→		**	**	**
Si / silicium	→		**	**	**
Hg / mercure	**	**	< 0,001	< 0,0001	0,05
As / arsenic	→		< 0,001	< 0,01	0,05
Ba / baryum	→		**	**	**
Cd / cadmium		→	**	**	**
Co / cobalt			**	**	**
Cr / chrome total		→	0,02	0,039	0,5
Cr ⁶⁺ / chrome hexavalent	**	**	< 0,05	0,022	0,1
Cu / cuivre		?	< 0,01	< 0,002	0,5
Ni / nickel		↓	0,01	< 0,004	0,5
Pb / plomb	→	↓	< 0,01	0,035	0,5
V / vanadium	**		**	**	**
Zn / zinc	→	↓	< 0,01	0,228	2
CN / cyanure	**	**	< 0,01	0,045	0,1
Phénol	**	**	< 0,1	0,1	0,1
Hydrocarbures totaux	**	**	**	< 0,002	10

Tableau 4 : tests de lixiviation effectués sur les laitiers.

Légende : = augmentation constatée du relargage, ↓ = diminution constatée du relargage, → = pas de variation constatée du relargage, ? = pas de tendance nette constatée ; ** = absence de données.

L'examen des résultats montre que les échantillons testés ne présentent pas de danger selon la procédure dite H 14 (MATE, 1998).

Enfin, il faut signaler que dans le Nord-Pas-de-Calais, dans l'attente d'une prochaine réglementation nationale qui devrait définir les règles environnementales d'usage en matière de valorisation des Résidus des Procédés thermiques (R.P.T), [18] les services administratifs compétents autorisent l'utilisation des laitiers sous réserve de la mise en place d'un plan d'assurance qualité, visant notamment à démontrer leur stabilité volumique, dont les modalités sont fixées par arrêté préfectoral. Dans ce cadre, sur chaque lot de production, ou sur un échantillon correspondant à 15 jours de fabrication si le lot de production excède cette durée, le producteur procède à une analyse sur le laitier brut et sur le lixiviat obtenu selon la norme XP 31-210 (PREDIS Nord Pas de Calais, 2002).

2. Transferts vers l'air

Le [décret n°94-784 du 2 septembre 1994](#) complète le règlement général des industries extractives (RGIE). Il s'applique aux travaux des mines et des carrières, à leurs installations de surface qui en sont le complément nécessaire ainsi qu'aux autres installations indispensables à l'exploitation. Les prescriptions du titre EM s'appliquent au personnel de l'exploitation

Les exploitants sont tenus de faire chaque année une campagne de la concentration moyennes en poussières inhalables et tous les deux ans deux campagnes de mesure des poussières alvéolaires siliceuses si la teneur en quartz est supérieure à 1%.

Concernant les laitiers sidérurgiques, des éléments d'informations ont été recueillis auprès d'exploitants (Cogesud à Neuves-Maisons et SLAG à Moyeuve Grande et Nilvange) qui procèdent à ces contrôles. Les conclusions des différents contrôles confirment que les mesures sont inférieures au seuil autorisé.

Cependant, tout comme pour les matériaux naturels, ces mesures ne sont pas réalisées lors de la mise en œuvre .

Aspects sanitaires

Aucune donnée publiée sur ce thème n'a été obtenue à ce jour

Utilisation dans les infrastructures routières

Sommaire

1. Utilisation en terrassement

2. Utilisation en chaussées

Deux normes européennes (NF EN 13043 et NF EN 13242) imposent des seuils de gonflement maximum selon l'usage (mélanges hydrocarbonés ou matériaux non traités) pour définir des catégories de granulats de laitier. Par exemple, un laitier de convertisseur à oxygène utilisé en mélanges hydrocarboné et ayant une dilatation maximale comprise entre 3,5 et 6,5 % en volume est classé en catégorie V_{6,5}.

Par contre, aucune règle ne précise la catégorie de laitier à utiliser selon la technique retenue.

[\[NCI19\]](#) Cela sera précisé dans l'application française de ces normes européennes granulats.

L'instabilité peut se caractériser par certaines dégradations assez typiques :

- revêtements hydrocarbonés : bosses en champignon, bossage transversal, soulèvement plus ou moins étendu avec fissuration, ondulation...,
- revêtements en béton de ciment : soulèvement et fissuration de dalles, bombement, désagrégation du béton maigre.

1. Utilisation en terrassement

Toutes filières confondues, le laitier d'aciérie est valorisé comme matériau de viabilité dans les techniques de génie civil comme remblai, protection de berges (Alexandre J. Boudonnet J.Y. 1993). De plus, leur masse volumique plus importante que celle d'un granulats naturel permet une utilisation en masque ou éperons drainants.

1.1.Filière convertisseurs à oxygène

Les domaines d'utilisation des laitiers de convertisseurs à oxygène, connus et éprouvés à ce jour, sont les domaines où les exigences de stabilité volumique du matériau ne sont pas essentielles . L'utilisation se limite essentiellement à des applications de GNT, à des remblais généraux, matériaux drainants, assainissement, pieux ballastés, renforcement de berges etc.

1.2.Filière électrique

Des couches de forme ont été réalisées en laitiers d'aciérie électrique (CTPL n°81 décembre 2001). Cependant, en fonction de leur classement selon la norme NF P 11-300, les terrassements ne sont pas la meilleure façon d'utiliser une ressource qui mérite plus de considération.

2. Utilisation en chaussées

2.1. Couches de liaison et d'assises

A ce jour, les laitiers d'aciérie, compte tenu des risques d'expansion, ont peu trouvé de débouchés dans le domaine routier, malgré des performances mécaniques relativement élevées.

2.2. Couches de roulement

§ Filière convertisseurs à oxygène

Une autre utilisation possible de ces laitiers se situe dans les couches de roulement en raison de leurs qualités mécaniques très intéressantes. Mais les premières expériences réalisées (dans les années 70) ont conduit à des désordres après quelques mois (excroissances à la surface du revêtement). Des études sur des enrobés bitumineux ont montré que ces problèmes pouvaient être très sensiblement limités par un concassage suivi d'un vieillissement du laitier (vieillissement à l'air, à l'eau, à l'eau chaude) (Panis A. 1976). De la même façon, les laitiers de convertisseur à oxygène pourraient éventuellement être utilisés pour la réalisation d'enduits superficiels après un vieillissement par simple stockage à l'air libre pendant 6 mois.

§ Filière électrique

Une enquête, réalisée en 1995-96 dans les pays de l'OCDE, révèle que dans la plupart de ces pays, les laitiers d'aciérie provenant essentiellement de la filière électrique sont principalement utilisés comme granulats dans des couches de roulement bitumineuses et enduits superficiels. Il est en plus d'une utilisation traditionnelle, pour les endroits difficiles : virages dangereux, courbes importantes, sites fortement exposés aux intempéries

Compte tenu de ses caractéristiques géotechniques intrinsèques très intéressantes, classe A et B selon les articles 7 et 8 de la norme XP P 18 540, l'utilisation des laitiers d'aciérie électrique est essentiellement réservée aux couches de roulement des chaussées. (-Didot J.C, L.R.P.C. Nancy S.D.C de 54 - 2000). Il est également un matériau d'ajout pour améliorer le CPA de certains granulats naturels.

Des études réalisées au Danemark ont démontré que ces matériaux utilisés dans des enrobés destinés à des trafics élevés pouvaient durer plus de 15 ans (autoroutes E20 et E45: 30 000 véhicules/jour). Un chantier expérimental mis en oeuvre à Moyeuve par la SLAG a permis de vérifier ces capacités (Société Lorraine d'Agrégats (S.L.A.G) 2001: «un Document de synthèse rédigé par la SLAG: «Pour rendre vos enrobés plus accrocheurs: un nouveau granulat »).

Sources sur le territoire français

Sommaire

1. Filière convertisseurs à oxygène

2. Filière électrique

1. Filière convertisseurs à oxygène

Il existe en France trois pôles de production de laitier de convertisseur à oxygène appartenant au groupe ARCELOR :

- Dunkerque avec une production de 450 000 t / an
- Fos-sur-Mer avec une production de 300 000 t / an
- Florange (Lorraine) avec une production de 170 000 t/an

2. Filière électrique

En Lorraine trois implantations existent :

- Neuves-Maisons : 50 000 tonnes de laitier / an
- Gandrange (UNIMETAL) : 150 000 tonnes de laitier / an
- Hagondange (Ascometal) : 30 000 tonnes de laitier / an

A noter que le CTPL collecte actuellement les données relatives à l'ensemble de la filière électrique en France, dans le cadre de la commission nationale des laitiers.

Le tableau 7 présente les moyennes de production annuelles sur les dernières années.

Laitiers aciéries électriques de fraîche production	Laitiers convertisseurs à oxygène de fraîche production	*Crassiers Toutes catégories d'aciéries confondues
800 000 T/an	1 100 000 t/an	*2 500 000 tonnes
J. Perême CTPL 2003	J. Perême CTPL 2003	(DIDOT, J.M. 2000)

Tableau 7 : production moyenne annuelle sur les dernières années

Emplois répertoriés

Sommaire

1. Filière convertisseurs à oxygène
2. Filière électrique

1. Filière convertisseurs à oxygène

Le risque d'expansion a jusqu'à présent dissuadé les ingénieurs routiers d'utiliser le laitier de convertisseur à oxygène comme granulat dans les graves hydrauliques. Par contre, les Allemands et Hollandais utilisent dans leurs graves des laitiers de convertisseur à oxygène en limitant leur quantité d'incorporation et leur granularité (exemple néerlandais : addition maximale de 25 % de laitier LD de granularité limitée à 0 /22 mm)

Il n'y a pas, à ce jour, de site expérimental répertorié. Toutefois, certains emplois de ces laitiers peuvent être listés (Alexandre et Boudonnet , 1993) :

- dans le Sud-Est, le laitier de convertisseur à oxygène est utilisé sous forme 0/3mm et à raison de 10 à 15 % afin de corriger la maniabilité des enrobés d'alluvionnaires ;
- dans le Nord de la France, des quantités importantes de laitier ont été utilisées pour la réalisation de couches de roulement après avoir été stockées 6 mois sous la forme 4/20 ;
- sur la RN 61 (Boero E, 2000) - Déviation de Sarreguemines – Glissement de terrain entre PR 6275 et PR 6500. Dossier 0067019. Les déblais se trouvant sur cette portion de la déviation de Sarreguemines ont présenté des désordres au sortir de l'hiver 1999/2000. Pour remédier à ces désordres, les confortements proposés ont été la réalisation de deux masques – bèches [\[NC120\]](#), comprenant 10 000 m³ de laitier de convertisseurs à oxygène 20100 issus de Schöneck.

2. Filière électrique

Citons quelques exemples d'emplois de ces laitiers.

- Dans le cadre de l'opération nommée " Route Centre Europe Atlantique ", la RN 80 reliant Chalon/Saône à Montchanin, en Saône et Loire, est mise au gabarit autoroutier. La maîtrise d'œuvre a été confiée par l'Etat à la DDE de Saône et Loire, service grands travaux. Le LRPC d'Autun intervient en tant que contrôle extérieur pour le maître d'œuvre. Au printemps 2001, 20_ 000 tonnes de laitiers d'aciérie électrique provenant d'un crassier du Creusot (Saône-et-Loire) ont été appliquées en couche de forme sur plusieurs voies de rétablissement, au col des Baudots. Les conditions d'agrément des matériaux ont été basées sur des critères géotechniques et environnementaux (CTPL, 2001, n°81).

Bétons bitumineux

Les laitiers électriques sont utilisés en formulation mixte, BBTM 0/14, BBSG 0/10 , BBTM 0/6, GB 0/20, BB 0/10. Citons à titre d'exemple leur emploi sur les chantiers suivants : mise à 2x2 voies RN4 à Maulan, liaison RN4-A31, contournement de Bar-le-Duc , A33 Fléville, déviation Sarrebourg.

Chantier expérimental

Il s'agit de la route d'accès à l'usine SLAG de Moyeuve (Société Lorraine d'Agrégats, 2001), réalisé en 1996, chaussée supportant un trafic d'environ 500 Poids Lourds par jour). L'enrobé est un BBSG 0/10. A l'issue de cinq ans de circulation (soit un trafic cumulé de 500 000 PL), les mesures moyennes de SRT témoignent d'une bonne adhérence (0,64 avec un minimum de 0,59 dans une zone de freinage et de courbe).

Enduits Superficiels

De nombreux renouvellement de couche de roulement sont réalisés (figure 11) en enduits superficiels avec des gravillons 4/6 et 10/14 sur chaussées, y compris à fort trafic en Lorraine (A33, A330, A30, RN333, RN4, RN57, RN59). En 2002, plus de 20 000 tonnes ont été utilisés.

Recherches en cours

Programme de recherche sur la «valorisation des laitiers d'aciérie de conversion LD pour les infrastructures routières » mené par le CTPL et le LCPC.

L'expérimentation lancée dans le cadre de ce programme de recherche se déroule sur le site ~~de~~ [du LCPC à Nantes](#) ~~du LCPC~~ et devrait permettre d'analyser l'intégralité des phénomènes physico-chimiques découlant de l'hydratation des granulats de laitier d'aciérie à l'oxygène mis en stock. Deux procédés de vieillissement sont testés (arrosage, immersion) afin de pouvoir étudier la cinétique d'hydratation du calcium libre et du magnésium libre selon le temps et la position du laitier dans le tas.

Ceci devrait permettre de préciser les procédures de mûrissement (dimension des tas de laitiers, durée de vieillissement, ...) assurant la stabilité dimensionnelle des couches de chaussées construites avec ces granulats.

Programme européen de recherche SESAR (STEEL SLAG ROAD AND ENVIRONMENT)

Le but de ce programme de recherche est l'élaboration d'une approche rationnelle pour la définition de « règles pour un bon usage » des laitiers sidérurgiques en construction routière. Ce programme concerne quatre laitiers différents (haut-fourneau cristallisé, haut-fourneau granulé, de type LD et d'aciérie de four électrique) et associe trois pays à travers les organismes suivants :

France : LECES Environnement

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC)

Allemagne : Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken (FEHS)

Autriche : [Österreichische Forschungs- und Prüfenzentrum \(ÖFPZ\)](#).

Différents essais environnementaux sont effectués sur les laitiers bruts ainsi que sur des mélanges entre les différents laitiers. Parmi ces essais, il y a des essais de lixiviation, de percolation, des essais en lysimètre. Simultanément des sites anciens, où des laitiers ont été utilisés, sont inspectés afin de contrôler l'impact des laitiers sur la pollution des sols et des eaux souterraines. En parallèle de ces essais, une modélisation des transferts de polluants dans les eaux souterraines est également effectuée.

Bibliographie [\[NCI21\]](#)

Sommaire :

1 Publications

2 Normes et textes

3 Littérature technique

1 Publications

ALEXANDRE J, BOUDONNET J .Y., 1993, Les laitiers d'aciérie LD et leurs utilisations routières, Laitiers sidérurgiques, n°75, CTPL, pp.57-62

BERANGER J, Henry G, Sanz G, 1994, Le livre de l'acier. Lavoisier, Paris, 1491 pages.

BOUDONNET J.Y., 1994, Les laitiers d'aciérie LD. La caractérisation chimique : une étape indispensable. Panorama des connaissances. Laitiers sidérurgiques CTPL n°76, pp 27-43.

BOUDONNET J.Y., 1996, L'essai européen d'expansion à la vapeur. Evaluation de la stabilité volumique des laitiers d'aciérie. Laitiers sidérurgiques CTPL n°79, pp15-24.

EUROGRANULATS; 1992 Brevet français et européen n°0539287: Assises de chaussées à partir de LAFE.

FALLMAN A.-M. HARTLEN J, 1994, Leaching of slags and ashes – controlling factors in field experiments versus in laboratory tests, Environmental aspects of construction with waste materials, Ed. Goumans J.J.J.M., van der Sloot H.A., Aalbers Th.G, Elsevier Science B.V., pp. 39-54.

HORNAIN H, RAFAI H, THURET B, 1995, Contribution à la détermination de la chaux libre dans les laitiers LD : problèmes rencontrés, principales conclusions, Laitiers sidérurgiques CTPL n°78, pp30-40.

SYLVESTRE P, CROSNIER J.; Tenue au gel d'une grave de laitier d'aciérie. Laitiers sidérurgiques CTPL, septembre 2003, n°84; pp.6-13.

LIND B.B., FALLMAN A.-M., LARSSON L.B., 2001, Environmental impact of ferrochrome slag in road construction, Waste Management, Vol. 21, pp. 255-264.

MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT, Janvier 1998 (MATE), Critères et méthodes d'évaluation de l'écotoxicité des déchets.

PANIS A., mai-juin 1976, Les scories LD, Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées, n°83, pp.99-104

PRIN-FERREIRA L., 2000, Étude du comportement hydraulique d'une gehlénite synthétique et de l'élimination d'inclusions de chaux, en vue de la valorisation de deux sous-produits de la sidérurgie : les laitiers cristallisés et les scories issues du procédé Linz-Donawitz. Thèse de doctorat, Nancy I.

RENAC, L. AUBERT, F. GAUDILLERE, J., 2001, Saône-et-Loire : des couches de forme en laitier d'aciérie. Laitiers sidérurgiques CTPL n°81 pp.6-10.

2 Normes et textes

DECRET n°94-784 du 2 septembre 1994. Il complète le règlement général des industries extractives(RGIE), institué par le décret n°80-331 du 7 mai 1980 en introduisant un titre "empoussièrage " EM (à ce jour, le RGIE comporte 19 titres). Le titre EM "empoussièrage " du RGIE est applicable depuis le 8 septembre 1995.

DECRET 2002-540 du 18 avril 2002 du Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement relatif à la classification des déchets. (JO du 20 avril 2002).

MINISTERE DE L'AMENAGEMENT, AWA/178-95/150 et des Transports DG1, Direction Générale des autoroutes et des routes. Circulaire AWA/178-95/150. Utilisation de matériaux de réemploi dans les travaux routiers.

NF EN 1741.1, septembre 1998, Propriétés chimiques des granulats. Article 19.3: détermination de l'expansion des scories d'aciérie.

NF P 11-300, septembre 1992, Exécution des terrassements. Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infra structures routières Norme XP X 31-210 mai 1998. Déchets. Essai de lixiviation. annulée en décembre 2002 remplacée par:

NF EN 12457-(1-2-3-4) décembre 2002: Caractérisation des déchets. Lixiviation

Norme XP P 18 540, octobre 1997, Granulats- définitions, conformité, spécifications.

Norme XP P 18 545, février 2004 , Granulats. Éléments de définition, conformité et codification.

NF EN 130 43, août 2003. Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et autres zones de circulation.

NF EN 132 42, août 2003. Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction de chaussées.

3 Littérature technique

BOERO. E, 2000, RN 61 L.R.P.C. RN 61 - Déviation de Sarreguemines – Glissement de terrain entre PR 6275 et PR 6500. Dossier 0067019

DIDOT J.C, 2000, LRPC Nancy S.D.C de 54., Schéma Départemental des Carrières de la Meurthe-et-Moselle.

DIDOT J.M., 2000, L.R.P.C. de Nancy, Ressources en granulats pour les usages routiers Région Lorraine, 31 pages.

GODMEL C ., 2004 ; Dossier L.R.P.C. Nancy. Réalisation d'une chaussée en zone artisanale à Gandrange (Moselle) avec une grave non traitée 0/31.5 de laitiers d'aciérie électrique.

IRH Environnement (Institut de Recherche Hydrologique), 1997, Nancy, dossier n° 97 LA 02.

LECES Environnement, 2001, Metz, dossier n° 98 C 15. Chapitre « Résultats d'analyses » publié par la société Eurogranulats.

LRPC Nancy, 1996, Dossier 96/1109: Cogesud; essai de gonflements sur le laitier électrique Granulac.

PREDIS Nord Pas de Calais (Plan Régional d'élimination des déchets industriels spéciaux), Septembre 2002: Groupe de travail n°5 " Améliorer la valorisation des déchets industriels en BTP " Guides Techniques régionaux.

SETRA- LCPC (2000 2^{ème} édition) : guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide Technique D 9233, encore appelé couramment GTR dans le réseau du ministère de l'équipement.

Société Lorraine d'Agrégats (S.L.A.G) 2001; P. Bruncher. Document technique de synthèse. Pour rendre vos enrobés plus accrocheurs: un nouveau granulats, les laitiers électriques de Gandrange.

Page : 1

[NCI1] Mettre Ministère de l'Environnement car à chaque changement de majorité on sera obligé d'allonger la liste.

Page : 1

[NCI2] Manque, détailler et mettre au Glossaire comme ceux d'avant.

Page : 2

[NCI3] Manque un verbe

Page : 4

[NCI4] Chaux riche en magnésium ou magnésie ?

Page : 5

[NCI5] Glossaire

Page : 5

[NCI6] Glossaire

Page : 7

[NCI7] Glossaire

Page : 7

[NCI8] Mérite peut-être une explication ?

Page : 7

[NCI9] Glossaire

Page : 8

[NCI10] Supprimer tout ce qui est inutile, ne garder que fer total et chaux libre en commentaire à la base du tableau.

Page : 9

[NCI11] CaO c'est déjà la chaux !

Page : 10

[NCI12] Glossaire

Page : 10

[NCI13] Glossaire

Page : 11

[NCI14] Glossaire

Page : 11

[NCI15] Glossaire

Page : 12

[NCI16] Glossaire

Page : 13

[NCI17] Test en français n'a pas la même portée qu'en anglais, en France on dit essai normé, un test en français n'a pas vocation normative mais simplement de constat, on parle de test anti-tuberculose mais d'essai de conformité. Dans le sens employé dans le texte c'est essai qui va le mieux.

Page: 14

[18] A modérer en fonction de l'absence d'évolution du dossier! Plus de commission, plus de projet véritable de réglementation, seulement un guide!

Page : 15

[NCI19] Expliciter cette phrase par une explication car seule elle reste un peu sibylline.

Page : 17

[NCI20] Expliciter et peut être mettre au glossaire

Page : 18

[NCI21] Revoir la bibliographie pour homogénéiser tout sur un même style, et cela pour toutes les fiches.

Annexe 2

Textes généraux

Avertissement

Certaines parties de ce texte auraient besoin de quelques légères améliorations.

Certains signes peuvent apparaître étranges ils correspondent à la transcription du texte de htm à word.

Textes généraux

Sommaire :

1. Introduction

2. Textes réglementaires

2.1 Textes réglementaires définissant les déchets

2.2 Textes réglementaires d'application

2.3 Textes relatifs à l'utilisation de déchets

2.4 Cas des déchets contenant de l'amiante

3. Textes normatifs

3.1 Normes « produits de construction »

3.2 Normes « environnement »

3.3. Normes de spécifications matériaux

4. Guides techniques

5. Lexique

6. Liste des principaux textes législatifs et réglementaires concernant les déchets

1. Introduction

Le terme de « déchet » est souvent pris dans son sens péjoratif car uniquement synonyme de nuisances visuelles ou olfactives (les ordures ménagères) ou de dangerosité comme l'amiante. Il s'agit là d'une vision très réduite, basée essentiellement sur des *a priori* (latin en italique), qui ne décrit pas toute la réalité que cache cette terminologie.

La législation et la réglementation, même si elles ne peuvent corriger la perception commune de l'Opinion Publique vis-à-vis des déchets, sont là pour définir ce qu'est un déchet, classer les déchets en catégories et donner des lignes directrices sur les modes de gestion voire les filières, possibles d'élimination (le devenir) de ces différentes catégories de déchets. Elles fixent également les responsabilités de chacun dans la chaîne d'élimination.

Toutefois, même si la réglementation en vigueur s'applique à une large gamme et parfois à des matériaux rarement assimilés à des « déchets » dans le langage courant, elle comporte des lacunes quant au domaine de l'utilisation de ces « déchets » en travaux publics.

2. Textes réglementaires

2.1 Textes réglementaires définissant les déchets

Article L.541-1 du code de l'environnement :

« Est un déchet, au sens de la loi, tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit, ou plus généralement, tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon ». La profession des travaux Publics n'échappe pas à cette règle et en produit deux catégories.

· Les résidus engendrés par la conception du projet, qui sont sous la responsabilité du Maître d'Ouvrage (MOA)^[1] et dont la gestion peut-être confiée contractuellement à l'entreprise.

· Les déchets engendrés par l'activité de l'entreprise pour réaliser un ouvrage confié par un MOA. Ces déchets de fonctionnement sont de la responsabilité de l'entreprise.

Article L.541-2 :

« Toute personne, qui produit ou détient des déchets, dans des conditions de nature à produire des effets nocifs sur le sol, la flore et la faune, à dégrader les sites ou les paysages, à polluer l'air ou les eaux, à engendrer des bruits et des odeurs et, d'une façon générale, à porter atteinte à la santé de l'homme et à l'environnement, est tenue d'en assurer ou d'en faire assurer l'élimination, conformément aux dispositions de la loi, dans des conditions propres à éviter lesdits effets ».

2.2 Textes réglementaires d'application

· **Code de l'environnement, livre V, titre 4**

Le titre 4, livre V, du code de l'environnement définit les grands principes concernant l'élimination des déchets et la récupération des matériaux. Si les parties sur la responsabilité, le transport et les sanctions sont communes à toutes les catégories de déchets, une attention toute particulière est donnée aux déchets ménagers et assimilés et les déchets dangereux. De plus, le code des collectivités territoriales impose aux communes la responsabilité de la gestion des déchets des ménages (collecte des ordures et des encombrants, informations du public concernant les autres déchets des ménages non collectés ...).

Selon le code de l'environnement, tout producteur ou détenteur de déchets est responsable de l'élimination de ses déchets, conformément à la réglementation en vigueur.

Par ailleurs, le code interdit les "décharges brutes ou dépôts sauvages"^[2] de même que « le brûlage à l'air libre », pratiques qui sont malheureusement encore monnaie courante de nos jours.

Le code prévoit de limiter la mise en décharge aux seuls déchets ultimes (ceux qui ne sont plus techniquement et économiquement valorisables), qui pourront être mis en dépôt définitif (~~centres de stockage des décharges de déchets~~ dangereux, dites CSD^[3] de classe ? de déchets ménagers ou assimilés, dites CSD de classe ??, ou de déchets inertes, dites CSD de classe ???).

· **Code de l'environnement livre V, titre 1**

Le titre 1 du livre V du code de l'environnement porte sur les installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE^[4]), réglementant entre autres le fonctionnement des installations de stockage, de traitement et élimination des déchets (décharges, usines d'incinération...) de même que les grandes installations industrielles (centres de production d'électricité par exemple).

La nomenclature des ICPE fixe la liste des installations soumises à cette réglementation.

· **Les différentes catégories de déchets.**

Les différentes catégories de déchets sont énumérées dans la liste des déchets, publiée par décret du 18 avril 2002. En fonction du type de déchet rencontré, il existe différentes filières d'élimination ou de traitement

La directive du 26 avril 1999 concernant la mise en décharge de déchets définit, parmi cette liste, trois classes de déchets : déchets dangereux, non dangereux et inertes (sous classe des déchets non dangereux). En France, une autre terminologie était utilisée :

DÉCHET INDUSTRIEL SPÉCIAL (DIS) = correspond à Déchets dangereux

Potentiellement le plus polluant pour l'environnement et créant le plus de dangers pour la santé humaine. Ces déchets nécessitent une traçabilité au travers d'un bordereau de suivi (BSDI)

dont une copie est systématiquement adressée au à l'inspecteur des installations classées de la DRIRE^[5](Directions Régionales de l'Industrie de la Recherche et de l'Environnement), dans le respect du principe POLLUEUR = PAYEUR.

DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES (DMA) ÷ correspond à une sous classe de déchets non dangereux

L'arrêté du 9 septembre 1997 modifié relatif aux installations de stockage de déchets ménagers et assimilés définit les DMA comme étant composés des déchets municipaux (relevant de la compétence des communes) et des déchets non dangereux (définis par décret en Conseil d'Etat en application de l'article L 541-24 du code de l'environnement, le décret du 18/04/02 actuellement en vigueur).

DÉCHET INDUSTRIEL BANAL (DIB) ÷ correspond à une sous classe de déchets non dangereux

Ne fait pas l'objet d'une nomenclature spéciale et est équivalent pour l'industrie des déchets ménagers et assimilés (DMA) pour les ménages.

Deux sous-catégories : D fermentescibles (végétaux) et F non fermentescibles (ex : palettes, plastiques).

DÉCHET INERTE (DI) : (*inerte*)

Qui, en cas de stockage, ne doit subir aucune modification physique, chimique ou biologique importante de nature à nuire l'environnement.

DÉCHET	TYPE DE VALORISATION	ÉLIMINATION
DIS (dangereux)	RÉGÉNÉRATION (cas des solvants)	Traitements physico-chimique Incinération ^[1] (classique, évapo-incinération, co-incinération) Installation de stockage CSD de classe I (12 en France) Stockage souterrain
	RECYCLAGE	
DIB (non-dangereux)	RÉUTILISATION	Installation de stockage CSD de classe II
	RÉEMPLOI	Incinération (classique, évapo-incinération, co-incinération)
	RÉGÉNÉRATION	
DI (inerte)	RECYCLAGE	Installation de stockage de classe
	RÉUTILISATION	III
	RÉEMPLOI	

Tableau 1. Exemple de filières courantes d'élimination des déchets

Un mélange de déchets de différentes catégories oblige à éliminer l'ensemble vers le site recevant le déchet le plus dangereux, d'où la nécessité économique ~~d'effectuer un non mélangé~~ éviter les mélanges ou effectuer un tri en amont.

2.3 Textes relatifs à l'utilisation de déchets

~~Deux~~ Seuls deux textes fournissent actuellement des éléments environnementaux pour l'utilisation de déchets :

- l'arrêté du 16 avril 1991 relatif à la valorisation des sables de fonderie
- la circulaire du 9 mai 1994 relative aux mâchefers d'incinération d'ordures ménagères.

A l'heure actuelle, ces deux textes sont les seuls, au niveau national, à prescrire des recommandations environnementales (valeurs-limites en polluants, prescription d'utilisation...) pour l'utilisation en technique routière en limitant toutefois leur champ d'application.

Les dispositions de ces textes sont fondées sur la comparaison des résultats d'un essai de lixiviation conventionnel, qui ne permet pas l'évaluation du comportement des déchets en interaction avec son milieu, avec des seuils qui ne sont pas fixés en tenant compte de la sensibilité des milieux récepteurs qui pourraient être touchés.

En effet, à cette époque, même si la fixation de ces seuils était dictée par le souci de protection de l'environnement, la connaissance et la maîtrise des notions d'impacts environnementaux (sur la qualité des eaux, sur les écosystèmes) ont eu pour conséquence que les niveaux de protection matérialisés par ces seuils réglementaires sont restés imparfaitement déterminés par des critères techniques et économiques.

Le retour d'expérience accumulé depuis, de même que les travaux normatifs qui se sont déroulés depuis une dizaine d'année (Cf. § 2.2.2), ont permis au **Ministère en charge de**

l'Environnement de lancer en 1999, un programme ambitieux destiné à élaborer une procédure puis un texte réglementaire permettant l'orientation uniforme de l'ensemble des Résidus de Procédés Thermiques (RPT), au titre desquels figurent les MIOM, les sables de fonderie ou les laitiers, vers différentes applications de travaux publics.^[6]

Les seuils qui seront fixés par ce texte seront, cette fois-ci, basés sur un souci de protection de la qualité des eaux et des sols (cf. <http://www.ademe.fr/travail/rpt>).

2.4 Cas des déchets contenant de l'amiante

Les déchets du TP peuvent contenir des fibres d'amiante (classement AIRC 1^[7]) sous plusieurs formes dont les 2 principales sont :

- dans les anciens enrobés
- dans des déblais sous forme de filons ou de mousse

Le décret n°96-1133 du 24 décembre 1996 pose le principe, entre autres, d'une interdiction de la mise sur le marché des fibres d'amiante (libres ou incorporées dans des matériaux) ; ~~néanmoins-mais~~ l'interdiction ne concerne pas les opérations relatives à l'élimination de ces produits.

En matière de dispositions particulières concernant l'amiante, le décret n°96-98 du 7 février 1996 relatif à la protection des travailleurs précise les règles qui s'appliquent lors d'intervention sur des matériaux susceptibles de libérer des fibres d'amiante mais dont la finalité n'est pas de traiter l'amiante (dite de section 3). La concentration moyenne en fibres d'amiante dans l'air inhalé ne doit pas dépasser 0,1 fibre/cm³ sur une heure de travail. Dans les comptages, ne sont retenues que les fibres dont la longueur est supérieure à 5µm et le diamètre inférieur à 3 µm.

Dans le cas des fraisats d'enrobé amiantés, la récupération des enrobés doit respecter les règles de protection individuelle des intervenants.

Le décret d'interdiction ne permet pas le recyclage de matériaux contenant de l'amiante. Ces déchets doivent être éliminés dans les décharges appropriées.

Toutefois en cas de découverte de filons d'amiante^[8], lors d'un terrassement, le pragmatisme doit rester de rigueur et mettre décharge des milliers de mètres cubes n'est pas toujours la solution idéale. Il conviendra de voir avec la DRIRE locale les solutions envisageables

3. Textes normatifs

3.1 Normes « produits de construction »

- **Notions de base, principes élémentaires**

Le vocabulaire de la qualité est défini par la norme NF X 50-120. Pour les matériaux, la qualité requise des matériaux, traduite sous forme d'exigences contractuelles, peut-être liée à des exigences de résultats ou **spécifications**, ou à des exigences de moyens ou **prescriptions**.

· **MARQUAGE CE**

La **Directive Produits de Construction** (D.P.C.) ^[9] "nouvelle approche particulière" a été adoptée en 1988 par l'ensemble des Etats membres de la Communauté Economique Européenne et a fait l'objet d'une transposition en réglementation nationale en 1992, lui donnant force de **loi** dans chaque état. Elle a pour objectifs d'harmoniser les réglementations techniques nationales de manière à éliminer les entraves aux échanges européens sur les produits, tout en maintenant la liberté des états de réglementer les ouvrages sur leur territoire, afin qu'ils assurent la sécurité des personnes et des biens et veillent au respect de l'intérêt général. C'est une "**nouvelle approche**", car les produits commercialisés doivent respecter certaines **exigences essentielles**. Elle est **particulière**, car ces exigences essentielles s'appliquent aux ouvrages. La présomption du respect des exigences essentielles par les ouvrages est fondée par la conformité des produits constitutifs à des **normes harmonisées**, laquelle est sanctionnée par le **marquage CE**. Ces exigences essentielles sont au nombre de 6 :

- ~~Résistance-résistance~~ mécanique et stabilité,
- , ~~Sécurité-sécurité~~ en cas d'incendie,
- f ~~Hygiènehygiène~~, santé et environnement,
- „ ~~Sécurité-sécurité~~ d'utilisation,
- ... ~~Protection-protection~~ contre le bruit,

† ~~Economie~~ économie d'énergie et isolation thermique.

Toutefois, les 3 exigences pouvant s'appliquer aux granulats sont détaillées ci-après :

Résistance mécanique et stabilité.

L'ouvrage doit être conçu et construit de manière à ce que les charges susceptibles de s'exercer pendant sa construction et son utilisation n'entraînent aucun des événements suivants :

- ~~Effondrement~~ effondrement de tout ou partie de l'ouvrage;
- ~~Déformations~~ déformations d'une ampleur inadmissible;
- ~~Endommagement~~ endommagement d'autres parties de l'ouvrage ou d'installation ou d'équipements à demeure par suite de déformations importantes des éléments porteurs;
- ~~Dommages~~ dommages résultant d'évènements accidentels disproportionnés par rapport à leur cause première.

Hygiène santé et environnement.

L'ouvrage doit être conçu et construit de manière à ne pas constituer une menace pour l'hygiène ou la santé des occupants ou des voisins du fait notamment:

- ~~D'un d'un~~ dégagement de gaz toxiques;
- ~~De de~~ la présence dans l'air de particules ou de gaz dangereux;
- ~~De de~~ l'émission de radiations dangereuses;
- ~~De de~~ la pollution ou de la contamination de l'eau et du sol;
- ~~De de~~ défauts d'évacuation des eaux, des fumées ou des déchets solides ou liquides;
- ~~De de~~ la présence d'humidité dans des parties de l'ouvrage ou sur les surfaces intérieures de l'ouvrage;

Sécurité d'utilisation.

L'ouvrage doit être conçu et construit de manière que son utilisation ou son fonctionnement ne présente pas de risques inacceptables d'accidents tels que:

- ~~Glissades~~ glissades;
- ~~Chutes~~ chutes;
- ~~Chocs~~ chocs;
- ~~Brûlures~~ brûlures;
- ~~Electrocutions~~ électrocutions;
- ~~Blessures~~ blessures à la suite d'explosions.

Les produits visés par la DPC doivent répondre à 4 **critères** :

• ~~existent~~ exister avant commercialisation,

• ~~sont être~~ commercialisés,

• ~~sont être~~ destinés à être incorporés de façon permanente dans un ouvrage

• ~~sont être~~ réglementés dans au moins un état membre.

Les normes harmonisées sont des normes produits européennes contenant deux parties : une partie volontaire, dont l'application est laissée à la discrétion des états membres, et une **partie harmonisée**, constituée par les **annexes « ZA [10] » et « Factory Production Control (FPC) [11] »**, **d'application obligatoire** dans chaque état. L'annexe ZA identifie les caractéristiques du produit liées aux exigences essentielles assorties de l'usage prévu, les méthodes de justification de la performance, les performances minimales, les clauses d'évaluation de la conformité et le système d'attestation de conformité (6 systèmes possibles, 4, 3, 2, 2+, 1 et le plus contraignant 1+). Le FPC définit un système de maîtrise de la production de granulats permettant de s'assurer de leur conformité aux exigences essentielles.

3.2 Normes « environnement »

Il existe une norme « cadre » au niveau européen qui fixe la méthodologie à suivre pour évaluer le comportement d'un déchet dans des conditions d'exposition spécifiques d'une situation donnée (scénario).

L'ENV 12920 – c'est son nom – a été développée par le Comité Technique 292, groupe de travail n°6 du CEN (CEN/TC 292 WG6). Elle se décline en sept étapes itératives :

1. Définition du problème et de la solution recherchée

- Que veut-on étudier et que cherche-t-on ?

2. Description du scénario

- Conditions normales et exceptionnelles d'exposition du déchet dans le scénario étudié

- Facteurs d'influence prédominants

3. Description du déchet

- Propriétés physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques

4. Détermination de l'influence de paramètres (physiques, chimiques, etc.) sur le comportement à la lixiviation (i.e. le relargage)

- Mise en œuvre d'essais permettant d'étudier l'influence des facteurs (étape 2) sur les caractéristiques du déchet (étape 3) et notamment son relargage

- Réalisation d'essais simulant l'exposition du déchet dans le scénario

5. Modélisation du comportement à la lixiviation

- Mise en équation des phénomènes influençant les propriétés du déchet dans le scénario et donc son relargage

6. Validation du modèle comportemental

- Vérifier la cohérence des résultats du modèle mathématique avec ceux issus de l'exposition du déchet dans le scénario

7. Conclusion

Cette norme a été largement utilisée en France (et en Europe) pour étudier le relargage de déchets utilisés comme matériaux en travaux publics au cours :

- ~~De-de~~ programmes de Recherche et Développement menés par le ministère en charge de l'Environnement et/ou les établissements publics placés sous sa tutelle et/ou les producteurs de déchets et/ou les entreprises de TP ;

- ~~De-de~~ projets réglementaires visant à élaborer des règles d'usage (ex : projet d'orientation des Résidus de Procédés Thermiques) ;

- ~~Du-du~~ développement de normes pouvant être utilisées au cours de l'étape 4 listée ci-dessus.

Concernant ce dernier point, plusieurs essais de lixiviation « paramétriques » font l'objet, actuellement, d'une normalisation européenne prioritaire :

- les prTS14429 et WI292033, ~~:-Lesqui sont des essais-essais-~~ de détermination de l'influence du pH sur la solubilisation des polluants, permettant également d'accéder à la capacité de neutralisation (pouvoir tampon).

- le prTS14405 ~~:-qui est unL-~~ essai de percolation en colonne permettant de déterminer la cinétique de relargage d'un déchet granulaire dans des conditions d'exposition réalistes mais pas réelles. Cet essai peut s'appliquer dans tous les cas où un déchet, lorsqu'il est mis en forme dans l'ouvrage où il est utilisé, forme un massif au travers duquel les eaux météoriques ou d'infiltration percole (ex : granulats simples ou traités à quelques pourcents de liants).

- le WI292040 ~~:-L'essaiqui est un essai~~ de lixiviation dynamique pour les déchets monolithiques, ~~qui est~~ le pendant du précédent mais pour des déchets formant un massif où l'eau ne circule pas à l'intérieur (ex : bloc de ciment).

Les essais prTS14429 et prTS14405 ~~seront devraient être~~ publiés courant 2004, le WI292033 le sera en 2005.

D'autres essais sont au programme de travail du groupe en charge du développement de ces normes, notamment celles devant être réalisées dans des conditions simulant les conditions réelles d'exposition d'un scénario donné.

3.3. Normes de spécifications matériaux

Un certain nombre de documents normatifs ont été publiés ou sont encore développés, tant en France qu'en Europe afin de classer les matériaux et donner des spécifications d'usage. Ces normes générales sont les suivantes :

- la PR NF EN 13242, ~~:-~~ « Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction de chaussées »

- la PR NF EN 13043, ~~:-~~ « Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et autres zones de circulation »

- la PR EN 13383, ~~:-~~ « Enrochements- partie 1 : Spécifications ; partie 2 : Méthodes d'essais »

- la NF EN 1744-1, ~~:-~~ « Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats »

- la NF P 11-300, ~~:-~~ « Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routière »

- la Norme XP P 18 540, ~~:-~~ « Granulats - Définitions, conformité, spécifications ».

4. Guides techniques

· Guide technique pour la réalisation des remblais et couches de forme SETRA-LCPC [12] (juillet 2000) : ce guide remplace la « recommandation pour les terrassements routiers » de 1976. Il définit les conditions d'emplois de matériaux en remblais et couches de formes. Il se compose de deux fascicules :

- ~~Le-le~~ premier comportant les principes généraux (classification des matériaux, condition d'utilisation en couches de forme, compactage...);

- ~~Le-le~~ second composé des « annexes techniques » (tableaux de classification des matériaux, tableaux des conditions d'utilisation en remblai et couches de forme...).

· Depuis des années, le retour d'expérience de l'utilisation de certains déchets aidant, des guides régionaux ont vu le jour. Sur cette base, l'objectif de ces documents est de fournir de l'aide à la décision pour les maîtres d'ouvrage et les maîtres d'œuvre. Ils constituent également un objectif de résultats pour les producteurs des déchets faisant l'objet d'un guide, désirant les valoriser :

Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-de-France (décembre 2001)

Monographie utilisation des matériaux recyclés de Haute-Normandie (mars 2000)

Guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et co-produits industriels – PREDIS Nord-Pas de Calais (décembre 2002)

A compléter...

5. Lexique.

* : extraits du "DICTIONNAIRE DE L'ENVIRONNEMENT AFNOR : LES TERMES NORMALISÉS"

CET : Centre d'Enfouissement Technique [13], **CSD** : Centre de Stockage de Ddéchets.

Décharge contrôlée : Procédé d'élimination des déchets (ou emplacement où ce procédé est utilisé) consistant à épandre ceux-ci sur un emplacement convenablement choisi, en respectant un certain nombre de règles permettant de supprimer les nuisances (X 30-011).

de classe I ou de classe II (réglementation des ICPE), de classe III (gérée par le Maire dans [14] le cadre de son pouvoir de police) – Guide technique élaboré par le M.A.T.E en Avril 2001.

Déchet : Tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau produit ou plus généralement tout bien meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon (X 30-011).

F [15] Déchet Inerte (DI)* : Déchet non susceptible d'évolution physico-chimique (par exemple : percolation d'éléments toxiques, fermentation, autocombustion, etc.) (X 30-011).

F Déchet Industriel Banal (DIB)* : Déchet résultant d'une activité industrielle mais assimilable à un déchet de consommation ou à des ordures ménagères (X 30-011).

F Déchet Industriel Spécial (DIS)* : Déchet dont la destination (élimination ou valorisation) nécessite des précautions particulières vis-à-vis de la protection de l'environnement (X 30-011).

Incinération : Réalisation d'une combustion complète des déchets combustibles dans un four adapté aux caractéristiques de ces déchets (X 30-011).

Valorisation : Terme générique couvrant le réemploi, la réutilisation, le recyclage ou la régénération.

Régénération : Procédé en général physique ou chimique, ayant pour but de redonner à un déchet les caractéristiques qui permettent de l'utiliser en remplacement d'une matière première neuve (X 30-011).

Recyclage : Réintroduction directe d'un déchet dans le cycle de production dont il est issu en remplacement total ou partiel d'une matière première neuve (X 30-011).

Réemploi : Nouvel emploi d'un déchet pour un usage analogue à celui de son premier emploi (X 30-011).

Réutilisation : Nouvel emploi d'un déchet pour un usage différent de celui de son premier emploi (X 30-011).

6. Liste des principaux textes législatifs et réglementaires concernant les déchets

Lien internet important : aida.ineris.fr

-Code de l'environnement (Partie législative)

Livre V Titre IV Déchets

Livre I Titre II Information et participation des citoyens

- Décret n° 93-1410 du 29 décembre 1993 fixant les modalités d'exercice du droit à l'information en matière de déchets prévues à l'article 3-1 de la loi du 15 juillet 1975 (JO du 31/12/93)
- Code des Douanes - articles 266 sexies à 266 undecies relatifs à la taxe générale sur les activités polluantes : article 45 de la loi de finances pour 1999 n° 98-1266 du 30 décembre 1998 (JO du 31/12/99))
- Décret 2002-540 du 18 avril 2002 relatif à la liste des déchets
- Décret du 5 juillet 2001 relatif à la création du Conseil national des déchets (JO du 07/07/01)

DECHETS MENAGERS ET ASSIMILES

- Décret n° 2000-404 du 11 mai 2000 relatif au rapport annuel sur le prix et la qualité du service public d'élimination des déchets (JO du 14/05/00)

a/ Plans départementaux d'élimination

Décret n° 96-1008 du 18 novembre 1996 relatif aux plans d'élimination des déchets ménagers et assimilés (JO du 24/11/96)

Circulaire du 28 avril 1998 concernant la mise en œuvre et l'évolution des plans départementaux d'élimination des déchets ménagers et assimilés

b/ Déchets d'emballages

Décret n° 92-377 du 1 avril 1992 portant application, pour les déchets résultant de l'abandon des emballages, de la loi n° 75-633 du 15 juillet 1975 modifiée (JO du 3/04/92), modifié par le décret n° 99-1169 du 21 décembre 1999

Décret n° 94-609 du 13 juillet 1994 portant application de la loi n° 75-633 du 15 juillet 1975 modifiée et relatif notamment aux déchets d'emballages dont les détenteurs ne sont pas les ménages (JO du 21/07/94)

Décret n° 98-638 du 20 juillet 1998 relatif à la prise en compte des exigences liées à l'environnement dans la conception et la fabrication des emballages (JO du 25/07/98)

c/ Déchets organiques

Circulaire du 28 juin 2001 relative à la gestion des déchets organiques

DECHETS INDUSTRIELS

Décret n° 77-974 du 19 août 1977 relatif aux informations à fournir au sujet des déchets industriels générateurs de nuisances (JO du 28/08/77)

Arrêté du 4 janvier 1985 relatif au contrôle des circuits d'élimination de déchets générateurs de nuisances (JO du 16/02/85)

Décret n° 96-1009 du 18 novembre 1996 relatif aux plans d'élimination de déchets industriels spéciaux (JO du 24/11/96) modifié par le décret n° 97-517 du 15 mai 1997 (JO du 23/05/1997)

DECHETS PARTICULIERS

a/ Amiante

Circulaire n° 96/60 du 19 juillet 1996 relative à l'élimination des déchets générés lors des travaux relatifs aux flocages et aux calorifugeages contenant de l'amiante dans le bâtiment (BO/MELTT du 31 août 1996)

Circulaire n° 97/15 du 9 janvier 1997 relative à l'élimination des déchets d'amiante-ciment générés lors des travaux de réhabilitation et de démolition du bâtiment et des travaux publics, des produits amiante-ciment retirés de la vente et provenant des industries de fabrication d'amiante-ciment et des points de vente ainsi que tous autres stocks (BO/MELTT du 10 mars 1997).

Circulaire n° 97/0320 du 12 mars 1997 relative aux conséquences de l'interdiction de l'amiante et élimination des déchets (non parue)

Circulaire n° 97/0321 du 12 mars 1997 relative à la modification des annexes des circulaires du 19 juillet 1996 et du 9 janvier 1997 relatives à l'élimination des déchets contenant de l'amiante (non parue)

b/ Boues d'épuration urbaine

Décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées (JO du 10/12/97)

Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles (JO du 31/01/98)

c/ Déchets d'activités de soins

Code de la santé publique : art. R 44-1 à R 44-11 (Décret n° 97-1048 du 6 novembre 1997 relatif à l'élimination des déchets d'activités de soins à risques infectieux et assimilés et des pièces anatomiques (JO du 18/11/97)

Arrêté du 7 septembre 1999 relatif aux modalités d'entreposage des déchets d'activités de soin à risques infectieux et assimilés et des pièces anatomiques (JO du 3/10/99)

Arrêté du 7 septembre 1999 relatif au contrôle des filières d'élimination des déchets d'activités de soin à risques infectieux et assimilés et des pièces anatomiques (JO du 3/10/99)

d/ Déchets de chantier

Circulaire du 15/02/00 relative à la planification de la gestion des déchets de chantier du bâtiment et des travaux publics (BTP) (BO/MATE n° 2000-03 du 20/03/00)

Circulaire du 18 juin 2001 concernant la gestion des déchets des réseaux routiers nationaux

e/ Huiles usagées

Décret n° 79-981 du 21 novembre 1979 modifié par le décret n° 85-387 du 23/03/85 et par les décrets n° 89-192 du 24/03/89, n° 89-648 du 3/08/89 et n° 93-140 du 3/02/93 portant réglementation des huiles usagées (JO du 23/11/79, du 31/03/85, du 31/03/89, du 14/09/89 et du 4/02/93) et par le décret n° 97-503 du 21 mai 1997 portant mesures de simplification administrative (art.44) (JO du 22/05/97)

Arrêté du 28 janvier 1999 relatif aux conditions d'élimination des huiles usagées (JO du 24/02/99)

Arrêté du 28 janvier 1999 relatif aux conditions de ramassage des huiles usagées (JO du 24/02/99)

f/ PCB

Directive du 16 septembre 1996 (96/59/CE) concernant l'élimination des polychlorobiphényles et des polychloroterphényles (PCB et PCT) (JOCE du 24/09/96)

Décret n° 87-59 du 2 février 1987 relatif à la mise sur le marché, à l'utilisation et à l'élimination des PCB et PCT, modifié par le décret n° 92-1074 du 2 octobre 1992

(JO du 4/02/87 et JO du 4/10/92), par le décret n° 97-503 du 21 mai 1997 portant mesures de simplification administrative (art. 44)(JO du 22/05/97) et par le décret n° 2001-63 du 18 janvier 2001 (JO du 25/01/01)

Arrêté du 13 février 2001 relatif à la déclaration de détention d'appareils contenant des polychlorobiphényles et des polychloroterphényles (JO du 6/03/01)

Circulaire du 21 février 2001 sur l'application du décret n° 87-59 du 2 février 1987 relatif à la mise sur le marché, l'utilisation et l'élimination des PCB et PCT, modifié par le décret n° 2001-63 du 18 janvier 2001

g/ Piles et accumulateurs

Directive du 18 mars 1991 (91/157/CEE) relative aux piles et accumulateurs contenant certaines matières dangereuses (JOCE du 26/03/91)

Décret n° 99-374 du 12 mai 1999 relatif à la mise sur le marché des piles et accumulateurs et à leur élimination (JO du 16/05/99), modifié par le décret n° 99-1171 du 29 décembre 1999 (JO du 30/12/99)

Arrêté du 26 juin 2001 relatif à la communication des informations concernant la mise sur le marché, la collecte, la valorisation et l'élimination des piles et accumulateurs

(JO du 12/07/01)

INSTALLATIONS DE TRAITEMENT DE DECHETS

Code de l'environnement

Livre V Titre I° Installations classées pour la protection de l'environnement

Nomenclature des installations classées (décret du 20/05/53 modifié, dernière mise à jour 30 avril 2002)

a / Installations de transit

Circulaire du 30 août 1985 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement (installations de transit, regroupement et prétraitement des déchets industriels) (JO du 17/12/85)

b/ Installations de compostage

Circulaire du 5 janvier 2000 relative à la nomenclature des installations classées pour la protection de l'environnement, classement des installations de compostage et des points d'apport volontaire de déchets ménagers triés (BO/MATE n° 2000-03 du 20/03/00).

c/ Installations d'incinération

Arrêté du 25 janvier 1991 relatif aux installations d'incinération des résidus urbains (JO du 8/03/91)

Arrêté du 10 octobre 1996 relatif aux installations spécialisées d'incinération et de coïncinération de certains déchets industriels spéciaux (JO du 16/10/96)

Directive 2000/76/CE du Parlement européen et du Conseil du 4 décembre 2000 sur l'incinération des déchets

Arrêté du 20/09/02 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 (JO du 01/12/2002)

Arrêté du 20/09/02 relatif aux installations d'incinération et de co-incinération de déchets dangereux (JO du 01/12/2002)

d / Installations de stockage

Arrêté du 18 décembre 1992 relatif au stockage de certains déchets industriels spéciaux ultimes et stabilisés pour les installations nouvelles (JO du 30/03/93), modifié par l'arrêté du 18 février 1994 (JO du 26/04/94)

Arrêté du 9 septembre 1997 (JO du 02/10/97) relatif aux décharges existantes et aux nouvelles installations de stockage de déchets ménagers et assimilés modifié par les arrêtés du 31/12/2001 (Arrêté du 31 décembre 2001 (JO du 2 mars 2002) et du 3 avril 2002 (JO du 19 avril 2002)

Directive du Conseil du 26 avril 1999 (1999/31/CE) concernant la mise en décharge des déchets (JOCE du 16/07/99)

Décision du Conseil du 19/12/2002 (2003/33/CE) établissant des critères et des procédures d'admission des déchets dans les décharges, conformément à l'article 16 et à l'annexe II de la directive 1999/31/CE (JOCE du 16/01/2003)

TRANSPORT DE DECHETS ET TRANSFERTS TRANSFRONTALIERS

Décret n° 98-679 du 30 juillet 1998 relatif au transport par route, au négoce et au courtage des déchets (JO du 06/08/98)

Arrêté du 12 août 1998 relatif à la composition du dossier de déclaration et au récépissé de déclaration pour l'exercice de l'activité de transport de déchets (JO du 26/09/98)

Arrêté du 9 septembre 1998 relatif à la composition du dossier de déclaration et au récépissé de déclaration pour l'exercice de l'activité de négoce et de courtage de déchets (JO du 3/10/98)

Règlement CEE n° 259/93 du Conseil du 1 février 1993 concernant la surveillance et le contrôle des transferts de déchets à l'entrée et à la sortie de la Communauté européenne (JOCE n° L30 du 06/02/93) modifié par le règlement CE n° 120/97 du Conseil du 20 janvier 1997 (JOCE n° L22 du 24/01/97) et par la décision du 24 novembre 1999 (JOCE n° L316 du 10/12/99).

Directive du 3 février 1992 (92/3/EURATOM) relative à la surveillance et au contrôle des transferts de déchets radioactifs entre Etats membres ainsi qu'à l'entrée et à la sortie de la Communauté (JOCE n° L35 du 12/02/92)

Décret n° 94-853 et arrêté du 22 septembre 1994 relatif à l'importation, à l'exportation, au transit ainsi qu'aux échanges de déchets radioactifs entre Etats membres de la Communauté avec emprunt du territoire national (JO du 02/10/94)

[1] L'incinération avec récupération d'énergie et la co-incinération en cimenteries peuvent être considérées comme des opérations de valorisation.

Technologie du traitement des déchets

Sommaire :

- 1 Introduction
- 2 Concassage et/ou broyage
- 3 Le tri
- 4 La solidification
- 5 La stabilisation et/ou "inertage"

1 Introduction

Assez fréquemment, et surtout lors de l'utilisation de Matières Premières Secondaires (MPS), les industriels du bâtiment travaux public procèdent à des préparations permettant de rendre les matériaux recyclés plus aptes à l'emploi projeté : d'une part, en diminuant leur potentiel de nuisance par rapport au milieu naturel dans l'objectif d'éviter un impact potentiel sur l'environnement, et d'autre part, pour améliorer leurs qualités mécaniques intrinsèques (maniabilité, tassement, ...) les rendant plus conformes au cahier des charges des ouvrages projetés.

Plusieurs types de préparation demeurent possibles : le concassage et/ou le broyage; le tri qui peut être basé sur la taille (criblage ou tamisage) ou sur leur densité (tri gravitaire, tri balistique ou aéraulique); la solidification (par l'activation de propriétés "pouzzolaniques", hydrauliques, ou l'ajout de liants); la stabilisation et/ou "inertage" (par évolution naturelle du matériau ou par ajout d'agents chimiques).

2 Concassage et/ou broyage

Ce mode de préparation peut avoir plusieurs objectifs : diminuer la taille des éléments pour satisfaire au fuseau granulométrique imposé par l'utilisation; libérer des composants indésirables; activer certaines propriétés physico-chimiques utiles à la mise en œuvre.

La réduction de taille des granulats, imposée par l'usage projeté, est une opération courante qui se fait dans une centrale de concassage. Elle nécessite généralement des produits en entrée avec des caractéristiques mécaniques homogènes pour obtenir des granulats bien calibrés. Le concassage des déchets minéraux est parfaitement envisageable pour les bétons. Mais, moins couramment utilisé pour les autres résidus minéraux à cause de la trop forte variabilité de leurs qualités mécaniques intrinsèques. Dans certains pays européens le concassage est utilisé systématiquement pour les Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères (MIOM) pour obtenir deux fractions, les sables qui sont utilisés comme filler pour des bétons, et les graves qui sont employées en technique routière.

Le concassage ou le broyage sont aussi utilisés pour faciliter les opérations d'extraction des minéraux indésirables (potentiellement polluants) ou comme dans les MIOM pour récupérer les ferrailles et les métaux non ferreux (recyclables). Dans ce cas, les opérations de réduction de granulométrie seront menées de manière à ce que la taille des éléments obtenus respecte la maille de libération des particules à éliminer ou à récupérer.

Enfin, concassage et broyage, peuvent être utilisés pour augmenter la surface réactive des résidus solides ou pour libérer des constituants réactifs améliorant les qualités physico-chimiques des produits.

3 Le tri

Mis à part le tri manuel qui est uniquement utilisé dans les centres de traitement des collectes sélectives, les techniques utilisées sont multiples. Elles s'adressent à diverses caractéristiques des matériaux: la taille et la forme pour le tamisage; la densité, la surface spécifique, la forme pour les tris gravitaire, balistique, aérauliques; les propriétés ferromagnétiques, paramagnétiques ou diamagnétiques pour les tris par magnétisme ou par courants de Foucault. Le tri par tamisage peut s'avérer efficace pour éliminer les gros éléments indésirables, ou permettre une pré-concentration des éléments ferreux comme des boîtes de conserves.

Les tris gravitaires et les tris balistiques, basés respectivement sur la densité des matériaux et l'énergie cinétique, permettront des enrichissements de fraction pour des phases minérales

données ou leur élimination basée sur l'importance des contrastes existants entre le matériau moyen et la phase à éliminer. Les tris aérauliques seront utilisés pour enlever les particules légères comme débris de papiers ou de cartons, des phases minérales valorisables.

Les tris basés sur les propriétés ferromagnétiques, paramagnétiques, et diamagnétiques, permettront l'extraction des métaux comme le fer (électro-aimant) ou des non métalliques comme l'aluminium (machine à courant de Foucault) qui peuvent nuire par leurs caractéristiques physico-chimiques à la qualité des matériaux obtenus après recyclage. Il faut aussi noter qu'à l'occasion de ces tris des plus values sont possibles par la vente des métaux extraits.

4 La solidification

La solidification est utilisée pour améliorer les caractéristiques mécaniques d'un produit par exemple la maniabilité d'une cendre pour en faire un granulats (grave) ou un monolithe (dalle) et de ce fait arrêter toute dispersion "particulaire" intempestive et diminuer la lessivage des éléments potentiellement toxiques.

Trois techniques peuvent être mises en œuvre pour solidifier un déchet granulaire : en employant des liants à réaction hydraulique ou des activateurs chimiques ayant le même objectif; par ajout de liants organiques; par fusion à haute température du produit pour obtenir après refroidissement un verre (exempt de minéraux cristallisés, trempage par refroidissement brutal) ou un "vitrifiat" (mélange de verres et de minéraux cristallisés, après un refroidissement plus lent).

Concernant les réactions hydrauliques, pour certains déchets ayant des caractéristiques physico-chimiques proches des clinkers (crus des ciments, silicates et/ou silicates calciques de haute température), seul un ajout d'eau et/ou de chaux (Ca(OH)_2), ou de soude (Na(OH)) permettant une alcalinisation du milieu peut provoquer une prise par hydratation des phases anhydres et la production des gels silicatés (c'est le cas de certaines cendres volantes de centrales thermiques ou plus généralement des MIOM). Mais, le plus souvent, les industriels utilisent du ciment Portland artificiel (CPA) qui, par ses caractéristiques physico-chimiques intrinsèques, assurera une prise parfaitement contrôlée du matériau dont la cohérence et la dureté dépendra de la quantité ajoutée. Ces techniques de solidification auront pour effet de produire des réactions physico-chimiques à l'intérieur du matériau avec des avantages purement physiques (aspect massif, améliorer la résistance mécanique, combler la porosité) mais aussi chimiques dont l'intégration de certains polluants dans des structures minérales. L'activation des propriétés hydrauliques ou l'ajout de liants peuvent être à l'origine de réactions secondaires dommageables aux structures de génie civil envisagées. Ainsi la présence d'aluminium disponible (métal, hydroxyde) est susceptible, à cause de la basicité du milieu induite par les ajouts, de produire en présence d'ion sulfates (SO_4^{2-}) des minéraux hydratés à fort volume spécifique comme l'ettringite $[\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26(\text{H}_2\text{O})]$ ou tout simplement les hydroxydes de métaux $[\text{Al(OH)}_3, \text{Fe(OH)}_3]$ qui peuvent par leur force de cristallisation casser une structure rigide. La présence d'oxyanions libres comme les sulfates et les phosphates $[\text{PO}_4^{3-}]$ libres peuvent aussi perturber la prise du ciment.

D'autres techniques comme l'ajout de liant organiques peuvent être envisagées. Les bitumes sont les plus usités, mais certaines sociétés ont breveté des procédés à base de plastiques de récupération. Le bitume possède une avance technologique indéniable du fait de son application commune en technique routière. Ce liant, qui correspond à un mélange complexe d'hydrocarbures aliphatiques, naphthéniques et aromatiques à masses moléculaires élevées est le produit de la distillation du pétrole (les goudrons provenant de la distillation du charbon sont proscrits), et n'a aucune interaction chimique avec le déchet qu'il enrobe. Ce n'est que par l'adhérence aux constituants minéraux de l'émulsion mélangée déchet, sa coalescence, et son durcissement que l'intégrité physique et la solidification de l'ensemble sont assurées. La solidification par des matières thermoplastiques est envisageable, mais la plus faible maniabilité du produit (viscosité) qui nécessite des températures de travail plus élevées font que leur utilisation est plus exceptionnelle. En outre, les bitumes paraissent a priori plus stables dans le temps que les matières plastiques.

La vitrification des certains résidus est une voie explorée par quelques industriels ; elle s'adresse à tous les composés contenant de silicium. Issue des techniques développées pour le

stockage des déchets radioactifs de haute activité, cette méthode de solidification et "d'inertage" par emprisonnement des substances potentiellement toxique peut être considérée à court et moyen terme (plusieurs centaines d'années) comme très efficace. Mais cette technique, malgré d'indéniables avantages, est pénalisée par l'essence même du procédé. Elle est "vorace en énergie" puisqu'elle nécessite d'atteindre des températures de l'ordre de 1400° C pour une fusion "optimisée" de tous les matériaux minéraux communs présents dans les matières premières secondaires potentielles. Elle est technologiquement très sophistiquée à cause des équipements mis en jeu - fours à arc (arc électrique), fours à induction (solénoïde), fours à plasma (arc électrique, champ magnétique et gaz), four oxy-gaz ou oxy-fuel (apport de carburant) - qui se démarquent fortement des "outils" de chantier et nécessite de ce fait des personnels hautement spécialisés et des coûts d'entretiens élevés. Peu prometteuses dans la conjoncture actuelle, l'avenir de telles méthodes ne peut être envisagé que dans l'hypothèse de leur association avec des sources d'énergies fournis par la cogénération (incinération des ordures ménagères et production d'électricité) et même l'extraction des éléments pénalisants (métaux, sels solubles,...) pour obtenir des produits purifiés "banalisables".

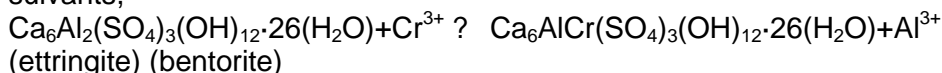
5 La stabilisation et/ou "inertage"

Souvent les termes de stabilisation et "d'inertage" apparaissent dans le langage des industriels. Ce sont des termes vagues. Ils signifient qu'après un traitement chimique ou physico-chimique, le potentiel de nuisance pour le milieu naturel d'un sous-produit d'une quelconque activité a été diminué. On peut alors, de ce fait, utiliser ce dernier comme MPS. Stabilisation et/ou "inertage" peuvent se définir selon deux actions qui n'auront pas les mêmes effets pour les polluants potentiels contenus dans le déchet : l'encapsulation et le piégeage minéral.

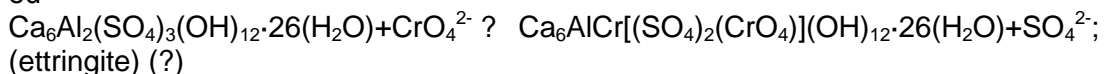
L'encapsulation aura pour effet d'assurer la rétention de la substance potentiellement polluante par une action purement "mécanique" en l'isolant de l'effet des agents lessivants. A ce titre, il faut considérer qu'un bitume ou une matière plastique qui n'ont pas ou peu d'interaction avec les molécules ou les éléments "minéraux", répondent fidèlement à cette définition. Par l'essence même de cette définition, dès que la structure assurant "l'encapsulation" présentera une faiblesse (photolyse, oxydation, dégradation d'origine biologique), l'isolation de la substance potentiellement polluante ne sera plus assurée, et cette dernière deviendra sujette aux aléas du milieu naturel.

Les effets du piégeage minéral seront tout autres. La substance polluante inorganique sera prise en compte dans la structure intime du minéral (comme composant constitutif à l'échelle atomique ou moléculaire), et sa mise en solution dépendra de la solubilité de la phase minérale ainsi formée. Pour illustrer ce propos, les cas de l'ettringite et des géhlénites sont intéressants :

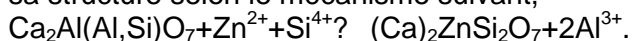
- Le premier minéral, de basse température, souvent formé dans les milieux alcalins (pH voisin de 11) peut, suivant l'état d'oxydation du milieu, piéger du CrIII ou CrV selon les mécanismes suivants,



ou



- La géhlénite, minéral de haute température présent dans beaucoup de Résidus de Procédés Thermiques (MIOM, laitiers silico-calciques), présentera la particularité d'intégrer du zinc dans sa structure selon le mécanisme suivant,



Bien que les piégeages minéraux soient dans leur principe plus satisfaisants que l'encapsulation, il faut toujours garder en mémoire que la stabilité des structures minérales dépend du pH, de l'état d'oxydation du milieu et de leur cinétique intrinsèque de dissolution. Ainsi, un minéral de haute température est souvent parfaitement instable dans les conditions du milieu naturel, mais la cinétique de dissolution étant très faible, il n'en demeure pas moins métastable, et donc sujet à une déstabilisation qui ne sera visible qu'à l'échelle des temps géologiques. Au contraire, les minéraux formés à basse température seront beaucoup plus sensibles aux aléas du milieu naturel ; une ettringite commencera à se déstabiliser dès que le pH du milieu perd son caractère alcalin. Le piégeage minéral des substances inorganiques

potentiellement toxiques peut être assuré de trois manières : par ajout de composés réactifs qui faciliteront la précipitation de minéraux assurant l'incorporation des composés indésirables dans leur structure intime (i.e., le phosphatage, le chaulage); par vieillissement de produits réactifs contenant naturellement les produits réactifs nécessaires (i.e., la maturation des MIOM); par vitrification. Dans ce dernier cas, les substances seront alors en solution solide dans le verre ainsi formé ou piégées dans des structures minérales (cas du zinc dans les géhlénites des verres à base de Résidus D'épuration de Fumées d'Incinération d'Ordures Ménagères). En conclusion de ce paragraphe concernant le piégeage minéral, il faut aussi prendre en considération la notion "d'encapsulage". Il est évident que la cristallisation de nouveaux minéraux, surtout pour les procédés développés à basse et moyenne température (sans fusion), peut par son dépôt à la surface des matériaux préexistant assurer aussi un effet "d'encapsulage".

Aspects Environnementaux

Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Détermination du comportement à la lixiviation
- 3 Détermination du transfert et des impacts par les eaux superficielles
- 4 Détermination de l'impact sur les écosystèmes

Annexe A : Recommandations pour la réalisation d'ouvrages expérimentaux

1.Introduction

De façon générale, l'impact environnemental d'un matériau intégré dans une chaussée doit être déterminé de manière globale, et peut éventuellement faire appel à différents types d'études, pluridisciplinaires, en fonction des cibles potentielles considérées :

- transfert vers les eaux souterraines : études du comportement à la lixiviation du matériau et modélisation hydraulique et hydrogéologique ;
- transfert vers les eaux de surface : études du comportement à la lixiviation du matériau et modélisation hydraulique ;
- impacts sur la faune et la flore (directs ou indirects) : études du comportement à la lixiviation du matériau et études écotoxicologiques sur plusieurs bio-marqueurs ;
- impacts sur l'homme (directs ou indirects) : évaluation des risques sanitaires (cf. chapitre 3 correspondant).

Les grands principes de ces différents types d'études sont présentés dans les sections suivantes afin de donner des éléments de compréhension et de connaissances vis-à-vis des études et essais cités dans les chapitres « aspects environnementaux » et « aspects sanitaires » des rubriques « produits ».

Actuellement, il n'existe pas de texte réglementant la valorisation de déchets en infrastructures routières sur la base de l'impact environnemental qu'ils sont susceptibles de générer. Les seuls textes potentiellement utilisables se rapprochant de cet objectif concerne la circulaire « mâchefers » (donc non réglementaire et uniquement pour les Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères - MIOM) du 09 mai 1994 relative à la valorisation des MIOM en techniques routières, et l'arrêté du 16 juillet 1991 relatif à l'élimination des sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse.

En effet, ces textes donnent des seuils d'orientation de ces déchets en technique routière en fonction de leur quantité lixiviable^[1] en certains éléments déterminée par un essai de lixiviation^[2] normalisé (NF X31-210). Ce protocole français, s'il est une référence pour le contrôle du potentiel polluant des déchets, ne tient pourtant pas compte des scénarios d'utilisation et n'est donc ni représentatif ni prédictif du comportement, à moyen et long terme, du matériau lors de son utilisation.

Depuis la parution de ces textes, le développement des recherches dans le domaine des déchets a fortement progressé, de même que la façon d'appréhender la question du

comportement du déchet dans l'ouvrage et des impacts environnementaux potentiels qui peuvent en résulter.

2. Détermination du comportement à la lixiviation

La notion de « comportement » peut se définir comme la manière dont un déchet ou plus généralement une matrice réagit ou évolue sous l'influence de contraintes extérieures. Le comportement à la lixiviation d'un déchet dans un ouvrage correspond donc à la manière dont ce déchet va relarguer ou non ses constituants sous l'influence des conditions d'exposition de ce déchet dans l'ouvrage.

Cependant, il est actuellement reconnu qu'il n'existe pas d'essai de laboratoire unique et universel permettant de connaître et reproduire avec certitude le comportement à la lixiviation d'un matériau intégré en infrastructures routières pour les raisons suivantes :

- La simple connaissance de la composition du matériau ne permet ni d'identifier les mécanismes de relargage ni de déterminer son comportement dans l'ouvrage. En effet, le relargage de ces éléments dépend de nombreux autres paramètres intrinsèques au déchet ou fonction des conditions d'exposition. On citera notamment la solubilité et la spéciation des éléments (c'est à dire l'identification des composés dans lesquelles ils sont présents), l'acidité ou la basicité du milieu (pH des eaux en contact avec le matériau), les réactions d'oxydo-réduction...

- La quantité et la durée d'émission des éléments ne sont pas prévisibles uniquement par la mise en œuvre d'essais de laboratoire. Elles requièrent l'application d'une phase de modélisation utilisant les données caractéristiques du déchet (cf. ci-dessus), les caractéristiques de l'ouvrage, les conditions d'exposition réelles de même que l'horizon de temps visé. Un tel exercice de modélisation doit ensuite être validé par la réalisation d'un ouvrage en grandeur réelle car les effets d'échelle (laboratoire / terrain) sont encore imparfaitement déterminés et pris en compte.

- Les impacts environnementaux éventuels dépendent des éléments émis (quantité, cinétique) mais aussi de leur devenir dans l'environnement lors de la phase de transfert de l'ouvrage – vers la cible.

De ce fait, de nombreux essais de laboratoire ont été élaborés afin de déterminer les grandeurs caractéristiques du comportement des déchets (comme la vitesse d'altération, la solubilité...) et l'influence de certains paramètres (comme le pH, la température, la nature de la solution de lixiviation...) sur ces grandeurs.

De même, depuis quelques années, des travaux sont en cours en vue de développer des modèles prédictifs du comportement et de l'impact potentiel du matériau en place à partir des résultats des essais de laboratoire. Cependant, les essais de terrain instrumentés sur de longues périodes, avec des caractéristiques connues de l'ouvrage, restent indispensables, et permettent de valider le comportement réel du matériau en place.

De manière à mieux appréhender cette notion de comportement, des méthodes et des outils ont été développés. Ils sont présentés dans cette section.

2.1 Norme méthodologique XP ENV 12920 (1998)

L'objectif de cette norme européenne est de fournir une méthodologie pour la détermination du comportement à la lixiviation d'un déchet dans des conditions spécifiées, c'est-à-dire dans un scénario d'élimination ou d'utilisation sur une période de temps donné. Cette méthodologie vise à garantir la prise en compte des propriétés spécifiques du déchet et des conditions du scénario.

La méthodologie comporte plusieurs étapes, dont certaines peuvent nécessiter la réalisation d'essais chimiques et/ou biologiques et/ou physiques et/ou de caractérisation minéralogique et/ou d'essais de lixiviation. Les essais sont choisis en fonction de l'objectif, du déchet considéré, du scénario (géométrie de l'ouvrage, conditions d'exposition, horizon de temps) et de la hiérarchisation des paramètres d'influence du scénario sur le déchet.

La méthodologie se compose des sept étapes suivantes :

1) Définition du problème et de la solution recherchée

Que veut-on étudier et que cherche-t-on ?

2) Description du scénario

- Conditions normales et exceptionnelles d'exposition du déchet dans le scénario étudié
- Identification et hiérarchisation des facteurs d'influence prédominants (et paramètres associés)

3) Description du déchet

- Propriétés physiques, chimiques, minéralogiques et mécaniques

4) Détermination de l'influence de paramètres (physiques, chimiques, etc.) sur le comportement à la lixiviation (i.e. le relargage)

- Mise en œuvre d'essais permettant d'étudier l'influence des paramètres identifiés à l'étape 2 sur les caractéristiques du déchet (étape 3) et notamment son relargage
- Réalisation d'essais simulant l'exposition du déchet dans le scénario (lysismètres de petites dimensions)

5) Modélisation du comportement à la lixiviation

- Mise en équation des phénomènes influençant les propriétés du déchet dans le scénario et donc son relargage

6) Validation du modèle comportemental

- Vérifier la cohérence des résultats du modèle mathématique avec ceux issus de l'exposition du déchet dans le scénario (lysismètres ou chantiers instrumentés)

7) Conclusion

Cette norme a été largement utilisée en France (et en Europe) pour étudier le relargage de déchets utilisés comme matériaux en travaux publics au cours :

- de programmes de Recherche et Développement menés par le ministère en charge de l'Environnement et/ou les établissements publics placés sous sa tutelle et/ou les producteurs de déchets et/ou les entreprises de TP ;
- de projets réglementaires visant à élaborer des règles d'usage (comme le projet d'orientation des Résidus de Procédés Thermiques) ;
- du développement de normes et d'essais pouvant être utilisés au cours de l'étape 4 listée ci-dessus.

Des exemples de tels essais et normes sont décrits plus en détail dans la section suivante.

2.2 Essais de caractérisation environnementale en laboratoire

Les différents types d'essais existants sont précisés ci-dessous. Des compléments d'informations peuvent être trouvés dans différentes études, notamment une étude bibliographique du BRGM [Lassin *et al.*, 2002] et le guide d'usage de la méthode d'évaluation de l'écocompatibilité des scénarios de stockage et de valorisation de l'ADEME [ADEME, 2002].

Pour essayer de clarifier leur usage et leur porté une typologie en cinq classes est proposée : (1) les essais de caractérisation de base, (2) les essais conventionnels (conditions simples et arbitraires), (3) les essais qualitatifs, (4) les modèles réduits (casiers lysimétriques), (5) les chantiers de présérie (ouvrages instrumentés en grandeur réelle).

1) Essais de caractérisation de base

- Détermination des caractéristiques intrinsèques : ce sont des essais qui fournissent des éléments qui sont indépendants du scénario, à un instant donné et dans des conditions définies. Par exemple, la composition chimique et minéralogique, la stabilité thermodynamique du matériau, la solubilité, les coefficients de diffusion peuvent être des caractéristiques nécessaires pour la détermination du comportement à la lixiviation du matériau. La connaissance de la minéralogie est importante dans la mesure où certains constituants ou certaines associations de composés peuvent engendrer des réactions indésirables pour la pérennité de l'ouvrage (compatibilité déchet / liant ou inadéquation déchet / utilisation visée).

- Evaluation du comportement à la lixiviation : il s'agit d'évaluer le relargage et l'évolution du relargage à partir d'un matériau par contact avec un agent lixiviant.

Pour ce faire, les essais suivants peuvent être réalisés :

- Comme les Eessais ayant pour objectif de mesurer des paramètres spécifiques, afin d'évaluer l'influence d'un paramètre sur le relargage du matériau. Par exemple, la température, le pH, le rapport L/S, le potentiel d'oxydo-réduction ou le débit d'agent lixiviant peuvent être des facteurs qui influent de manière plus ou moins importante sur le comportement à la lixiviation suivant le matériau et le scénario considérés.

Le projet de norme prEN 14429 décrit par exemple un essai de détermination de l'influence du pH sur la solubilisation des constituants d'un déchet. Il permet également d'évaluer la capacité de neutralisation acido-basique de ce déchet.

A l'instar de la minéralogie, ce type d'essai, est très utile pour la détermination de l'adéquation déchet / liant dans le cas d'un traitement par exemple, en visualisant bien l'évolution du relargage potentiel dans le contexte chimique (pH) que pourra imposer le liant.

· Les essais ayant pour vocation d'évaluer ~~Essais d'évaluation de~~ la cinétique de relargage : Il s'agit d'essais dans lesquels le déchet est mis en contact avec l'agent lixiviant (en général de l'eau déminéralisée) selon une configuration proche du mode de contact dans l'ouvrage.

Ces essais étant encore réalisés au stade laboratoire, les dispositifs expérimentaux sont de petites dimensions. Même si les conditions sont représentatives elles ne simulent pas précisément ce qui se passera dans l'ouvrage. L'important est d'avoir un certain niveau de contrôle des conditions opératoires pour comprendre les phénomènes et mécanismes de relargage, ce que ne permet pas un essai de plus grandes dimensions comme les lysimètres ou les chantiers instrumentés.

On distingue les types d'essais suivants :

- L'essai de percolation à flux ascendant (comme le projet de norme prEN14405) ou descendant, en mode saturé (cas de la prEN14405) ou non saturé pour les matériaux se comportant comme des massifs percolants (cas des équivalents sols, des graves non traitées et de certaines graves traitées au liant).

Dans le projet de norme prEN14405, on fait à faire passer de l'eau du bas vers le haut, à débit fixé et en mode saturé, dans une colonne qui contenant le matériau granulaire (fragmenté ou en l'état). Cela permet de se rapprocher des conditions réelles en tenant compte de l'épaisseur, de la taille et de l'espacement des grains du matériau en place. Le mode de remplissage et de compactage, de même que le flux ascendant et la saturation de la colonne permettent d'éviter au maximum le passage de l'eau par des chemins préférentiel.

Ce permet d'obtenir des concentrations et des quantités d'espèces relarguées en fonction du temps et donc du volume d'eau percolé (rapport L/S), sur une durée réduite par rapport aux conditions réelles.

- L'essai de lixiviation dynamique des monolithes si le matériau ne se comporte pas comme un massif percolant (cas des graves traitées au liant)

L'orientation entre l'essai de percolation et l'essai de lixiviation pour les monolithes, notamment lors de RPT traités au liant hydraulique ou bitumineux, se fera sur la base d'une mesure de conductivité hydraulique à saturation.

Si la mesure est supérieure à 10^{-8} m.s^{-1} , alors l'eau percolera dans le matériau ou du moins dans la couche constituée par le matériau et c'est donc l'essai de percolation qui est à réaliser.

Si la mesure est inférieure à 10^{-8} m.s^{-1} , alors l'eau ne percole pratiquement plus dans le matériau et donc il est recommandé de réaliser un essai de lixiviation dynamique pour les monolithes.

- Les ~~E~~ essais statiques par contact si le déchet granulaire ou monolithique est simplement noyé dans une solution dont la nature est connue. Ici, on se place dans des conditions opératoires où le matériau réel serait totalement en contact avec de l'eau de façon prolongée.

- Enfin les ~~E~~ essais de simulation, destinés à simuler l'effet combiné de différents paramètres sur le relargage, dans le scénario considéré. Les essais lysimétriques et comme les essais sur colonne à grande échelle peuvent être cités comme exemples d'essais de simulation.

~~Ces e type d~~ essais doivent permettre de valider les tendances observées en laboratoire concernant le comportement environnemental et de valider les résultats de la modélisation prédictive si elle a été effectuée (cf. section 2.2.3).

2) *Essais conventionnels (conditions simples et arbitraires)*

Ces essais sont les essais les plus couramment utilisés car ils sont simples de mise en œuvre et applicables à tout type de matrice solide, pulvérulente ou pâteuse. Leur répétabilité et leur reproductibilité sont également très bonnes. Ces essais sont destinés à recueillir des données dans des conditions arbitraires et conventionnelles (exemple : relargage à granulométrie, L/S, et durée fixés) :

- le Le pH de l'agent lixiviant peut être neutre au départ (eau déminéralisée^[16]) et peut évoluer dans le temps en fonction des propriétés acido-basiques des espèces chimiques présentes dans le matériau. Au contraire, il peut être décidé de maintenir des conditions extrêmes agressives pour le matériau tout au long de l'essai.

- Le rapport liquide sur solide L/S est élevé (supérieur à 10) pour favoriser la solubilisation des espèces chimiques analysées, et éviter au maximum la saturation de la solution.

- Le matériau est broyé, si nécessaire, pour augmenter la surface d'échange entre le matériau et l'eau.

Ces essais ne sont donc pas destinés à évaluer le comportement à long terme des déchets, en particulier en vue d'une utilisation en scénario routier.

Ils ont souvent fait l'objet de normes et ont servi de base pour la mise en place de la réglementation sur les déchets : arrêtés relatifs au stockage des déchets dangereux, valorisation des sables de fonderie, circulaire mâchefers... Il en existe pour les matériaux granulaires (XP X 31- 210, prochainement remplacé par la norme européenne XP X 30- 402, partie 2), et également pour les matériaux monolithiques (XP X 31- 211 et XP X 31- 212, et développement d'un projet de norme européenne « essai de conformité : essai de lixiviation des déchets monolithiques »).

3) Essais qualitatifs

Très peu de recherches et d'études concernent actuellement le développement de ce type d'essais. Généralement, l'aspect pratique de terrain et l'expérience des responsables d'exploitation priment sur la réalisation d'essais concrets, autres que ceux décrits précédemment.

Cependant, on peut tout de même citer quelques méthodes utilisées : analyses par des appareils de fluorescence X portatifs, utilisation de peintures sensibles aux goudrons (HAP), essais courts de lixiviation...^[17]

4) Modèles réduits : cases-casiers lysimétriques

Ces expérimentations, mêmes si elles peuvent être rattachées aux essais de simulation de la caractérisation de base, méritent d'être développées.

Ce sont des essais à mi-chemin entre le test de laboratoire et l'ouvrage expérimental en grandeur réelle. Ils consistent à disposer un matériau mis en œuvre (granulométrie, compactage...) de manière la plus représentative du scénario réel, dans une structure à l'échelle semi-industrielle (colonne, case, lysimètre...), dont les dimensions sont fixées en fonction de la granulométrie du matériau, et à exposer ce matériau à de l'eau de manière contrôlée ou directement aux précipitations naturelles (en tenant compte dans ce cas des phénomènes d'évaporation).

Les eaux de percolation sont recueillies en bas de la structure et analysées en fonction du temps et du ratio liquide sur solide (L/S).

5) Chantiers de présérie : ouvrages instrumentés en grandeur réelle

Ce type d'ouvrage doit permettre en particulier de s'affranchir de l'effet d'échelle qui peut être occasionné lors des deux précédents niveaux, à savoir le laboratoire et les lysimètres. Son objectif principal est la vérification de la faisabilité technique de mise en œuvre en situation et l'évaluation de la conformité du relargage par rapport aux résultats laboratoire, notamment les résultats de la modélisation prédictive si cette dernière a été effectuée.

Pour pouvoir connaître de la façon la plus précise possible les lois de transfert des substances chimiques, un ouvrage expérimental doit respecter un certain nombre de principes et d'exigences qui sont précisés en **annexe A**.

2.3 Modélisation^[18]

La modélisation consiste à élaborer puis à appliquer un modèle de comportement, à partir d'une hiérarchie logique de l'influence des paramètres physiques, biologiques, chimiques et de mise en œuvre identifiés pour l'utilisation envisagée. Cela fournit un ensemble de relation décrivant le comportement à la lixiviation du déchet dans le scénario d'utilisation envisagé.

Cette hiérarchie logique ne doit tenir compte que des principaux paramètres d'influence et éliminer ceux dont l'effet s'avère négligeable ou sans importance (Cf. étape 2 et 4 de la méthodologie ENV 12920).

Généralement, afin de prendre en compte l'influence des principaux paramètres liés aux conditions d'exposition, sur le relargage des espèces solubles, une modélisation couplant la chimie du déchet/matériau et ses mécanismes d'altération et de relargage est nécessaire.

Il faut dans un premier temps comprendre quels sont les phénomènes physico-chimiques qui entrent en jeu lors d'un contact avec un lixiviant. Cette étape permet de connaître les équilibres chimiques à prendre en compte pour chaque élément considéré dans la modélisation du relargage. Les données d'entrée sont fournies par des résultats de caractérisation chimique et minéralogique et/ou des résultats d'essais de détermination de l'influence de paramètres tels que le pH, le potentiel d'oxydo-réduction, la température, les composés organiques dissous, etc. sur la solubilisation des polluants.

Cette modélisation chimique doit ensuite être couplée à une modélisation du relargage qui est basée sur la caractérisation des mécanismes de lixiviation d'un matériau. Les données d'entrée sont fournies par la mise en œuvre d'essais de caractérisation intrinsèque et d'essais de lixiviation dans des conditions les plus représentatives possibles des conditions d'exposition réelles (exemple : essai de percolation à flux ascendant pour les déchets formant un massif percolant).

Elle permet également d'accéder à des paramètres non déterminables expérimentalement.

3 Détermination du transfert et des impacts par les eaux superficielles

Partie en construction.

4 Détermination de l'impact sur les écosystèmes

Partie en construction.

Annexe A : Recommandations pour la réalisation d'ouvrages expérimentaux

Ces données sont issues du CETE de Lyon.

Principes généraux

- L'ouvrage expérimental devra représenter le scénario-type de la future filière d'utilisation (épaisseur, mise en œuvre, couverture...). Cela permet de prendre en compte les interactions entre le déchet et les autres matériaux utilisés dans l'ouvrage et d'utiliser les résultats avec **le** un minimum d'hypothèses.
- Le chantier expérimental doit permettre de donner des informations claires sur la faisabilité mécanique et environnementale. Les observations, mesures et contrôles, doivent porter sur ces deux aspects.
- Pour l'aspect environnemental, l'objectif est de fournir des résultats en terme de flux relargué (flux sortant d'ouvrage) par période, basé sur la mesure des volumes et concentration entrant dans le milieu naturel.
- Deux possibilités peuvent être proposées :
 - *Ouvrage réel, à la taille d'un chantier correspondant à l'utilisation envisagée.* Ce plot doit alors avoir une structure identique à celle visée ultérieurement.
 - *Ouvrage réduit sur lysimètre.* Ceci permet de tester des variantes sur les caractéristiques des plots ~~variante~~, et aider au dimensionnement. Cependant au moins un des lysimètres devra correspondre à la structure visée ultérieurement. Les conditions de réalisation à petite échelle doivent prouver leur similitude avec des conditions réelles de chantier. Par ailleurs ce suivi peut être établi avec la mesure concomitante de paramètres hydriques et chimiques dans la structure, permettant de proposer une démarche scientifique de prévision.
- Afin de disposer d'une référence pour l'ouvrage considéré, il peut être proposé d'instrumenter deux plots pour la même structure : un plot contenant le déchet, et un plot constitué de matériau traditionnel. Pour des plots strictement routiers, la surface de chaque plot doit être suffisante pour obtenir un volume d'eau analysable. Les plots réalisés depuis 1992 conduisent :
 - de 40 m² dans le cas d'un remblai non recouvert ;
 - de 100 m² pour une structure peu perméable (chaussée, matériau traité...).

Description d'un plot expérimental type routier

- L'ouvrage doit être étanchéifié-étanché en fond et latéralement sur les bords.

- Un dispositif drainant, constitué d'un drain seul ou associé à une couche drainante, doit être posé en fond de structure.
- Le dispositif de récupération d'eau doit permettre de recueillir l'eau de percolation (et éventuellement le ruissellement). Il doit être également dimensionné de façon à pouvoir stocker la totalité de l'eau accumulée entre deux prélèvements successifs, à l'abri de l'air et dans des conteneurs chimiquement inertes (béton exclu).
- Un dispositif de suivi de la pluviométrie et de la qualité des eaux de pluie peut être installé à proximité immédiate de l'ouvrage. Pour les structures assez perméables, la qualité chimique de l'eau de pluie peut être nécessaire.

Suivi de l'ouvrage

- Afin d'établir le bilan hydrique, le volume d'eau récupéré à la base du plot doit être mesuré à l'occasion de chaque prélèvement. Un échantillon représentatif est prélevé après brassage et [19]homogénéisation pour analyse, puis le regard est vidé.
- Les prélèvements doivent être effectués avec une fréquence hebdomadaire pendant la phase chantier, puis mensuelle pour la phase de suivi-. Ils sont à adapter en fonction du type de plot testé. La durée de suivi doit normalement correspondre à une année hydrologique, sauf adaptation particulière à justifier.
- Les résultats seront exprimés en quantité recueillie (mg, g ou kg), puis ramenés à un flux sortant d'ouvrage (quantité/m²/an), afin de servir comme élément de comparaison et d'extrapolation. *C'est ce flux qui doit être comparé à ceux acceptables par le milieu naturel.*
- On pourra éventuellement en plus comparer les résultats avec des modèles numériques ou/et par rapport à un potentiel donné par un essai de laboratoire à plus court terme en se ramenant à un flux rapporté à la masse de déchet.

A l'heure actuelle, l'extrapolation à d'autres structures ou d'autres épaisseurs (autres scénarios) n'est pas envisageable à partir d'un plot donné. Le choix et la représentativité de la structure testée sont donc fondamentaux.

[1] Relargable dans l'eau (ou plus généralement dans tout autre liquide).

[2] La lixiviation d'un solide correspond à l'extraction d'un ou plusieurs éléments/composés solubles par l'eau ou par un solvant spécifique [Lassin *et al.*, 2002].

Aspects sanitaires

Sommaire

- 1 Notions de danger et de risque dans un cadre sanitaire
- 2 Intérêt de l'évaluation des impacts sanitaires dans le contexte d'OFRIIR
- 3 Notion de schéma conceptuel d'exposition
- 4 Notion de schéma conceptuel d'exposition
5. Cas particulier des risques professionnels

1 Notions de danger et de risque dans un cadre sanitaire

Dans un contexte sanitaire, le danger est la situation ou la possibilité pour une substance, du fait de ses caractéristiques ou propriétés intrinsèques, de provoquer des dommages aux personnes, tandis que le risque est la probabilité qu'un effet indésirable (appelé aussi effet adverse) se réalise dans des conditions d'exposition données de ces personnes [BRGM et INERIS, 2000].

Le risque est donc la quantification, le plus souvent en termes probabilistes, de réalisation d'un effet indésirable lié à une substance intrinsèquement dangereuse en fonction de l'exposition à cette substance. La quantification du risque sanitaire est différente selon le type d'effets provoqués par les substances chimiques sur la santé : effets à seuil et effets sans seuil.

Exemple d'une substance à seuil (cas d'une substance non cancérigène pour laquelle il existe un seuil de toxicité). Une exposition chronique au perchloroéthylène peut engendrer des nausées, des maux de tête, des vertiges... Le danger est ici le développement de ces effets

adverses suite à une exposition au perchloroéthylène. La quantification du risque sanitaire [INERIS et BRGM, 2000 ; INERIS, 2003] consiste dans ce cas à comparer la dose d'exposition à cette substance, calculée dans des conditions bien déterminées, à une dose tolérable définie sur la base de données toxicologiques, et considérée comme une dose limite supposée sans effet sur la santé humaine. Cette comparaison est donnée sous la forme d'un indice de risque (IR), par exemple « la dose d'exposition représente 12% de la dose tolérable ».

Exemple d'un effet sans seuil (cas d'une substance cancérigène pour laquelle il n'existe pas de seuil de toxicité). Le chlorure de vinyle est une substance dangereuse pour la santé humaine, entre autre parce qu'elle est considérée comme cancérigène. Le danger est ici principalement le développement d'un cancer du foie suite à une exposition au chlorure de vinyle. En appliquant une méthodologie d'évaluation des risques sanitaires [INERIS et BRGM, 2000 ; INERIS, 2003], il est possible de quantifier le risque de survenue d'un cancer du foie en fonction de l'exposition au chlorure de vinyle dans des conditions bien déterminées. Le résultat sera donné en excès de risque individuel (ERI) [20], par exemple exprimé sous la forme de « 1 cas pour 100 000 » ou 10^{-5} .

Certaines substances chimiques peuvent avoir à la fois des effets à seuil et des effets sans seuil. C'est par exemple le cas du chlorure de vinyle, du chloroforme, du trichloro-éthylène...

2 Intérêt de l'évaluation des impacts sanitaires dans le contexte d'OFIR

La valorisation des déchets, en particulier dans les infrastructures routières, concerne généralement des déchets classés non dangereux ou inertes. En l'absence de ce caractère dangereux, un tel déchet ne présente a priori pas de risque. Cependant, cette notion de dangerosité étant basée sur un effet potentiel sur l'environnement, l'absence de danger n'est pas toujours acquise de façon irréfutable. Cette incertitude sur l'absence totale de danger, et donc de risque sur la santé humaine, justifie l'intérêt que l'observatoire OFIR porte à ces aspects au sein de chaque rubrique thématique.

La quantification des risques sanitaires permet de comparer, dans un contexte particulier, l'exposition des populations, éventuellement engendrée par la valorisation de déchets en infrastructure routière, à une exposition considérée comme tolérable. Il convient de noter que cette approche est encore très peu utilisée, et que très peu de données sont actuellement disponibles. C'est pourquoi la partie des rubriques thématiques relative aux risques sanitaires ne sera, dans la plupart des cas, que partiellement renseignée.

Il convient également de noter que l'approche d'évaluation des risques sanitaires est basée sur la prise en compte des substances chimiques présentes dans les différents compartiments environnementaux. Cependant, un déchet est le plus généralement composé de plusieurs substances. De plus, ce n'est pas parce qu'un déchet sera valorisé en sous-couche routière que l'ensemble des substances qui le composent sera susceptible de migrer vers les compartiments environnementaux voisins. L'application d'une démarche d'évaluation des risques sanitaires à la valorisation des déchets en infrastructure routière suppose au préalable une bonne connaissance des caractéristiques physico-chimiques de ces déchets ainsi que du potentiel de mobilisation des substances contenues dans ces déchets. C'est pourquoi les rares études d'évaluation des risques sanitaires réalisées dans un contexte de valorisation des déchets se focalisent le plus souvent sur une ou deux substances particulières présentes dans ces déchets.

3 Niveaux de risque de référence

La quantification du risque dépend en grande partie de l'évaluation qui est faite de l'exposition des cibles à une substance dangereuse. De plus, en cas d'exposition à plusieurs substances, les risques sont susceptibles de se cumuler. En conséquence, il n'existe pas, dans le cas général, de valeurs seuils de concentration d'une substance dans l'air, l'eau ou les sols, en deçà desquelles cette substance ne présenterait pas de risque pour la santé. En revanche, des « niveaux de risque de référence » sont définis.

En France, ces niveaux de risque de référence font office de niveaux « tolérables » au regard de la santé humaine, même s'ils ne sont pas officiellement désignés comme tels. En outre, ils ne sont applicables stricto sensu qu'à la réhabilitation de sites pollués : il s'agit en effet, selon la

circulaire du 12 décembre 1999 du Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement relative aux principes de fixation des objectifs de réhabilitation des sites et sols pollués, de niveaux de risque sur lesquels devront être basés les objectifs de réhabilitation des sites pollués.

Dans le cas d'une substance à seuil, le critère d'appréciation du risque est un indice de risque IR inférieur à 1, ce qui signifie que la dose d'exposition à cette substance est supposée être inférieure à la dose tolérable sans effet sur la santé humaine. En cas d'exposition à plusieurs substances à seuil, en première approche, la somme des indices de risque de chaque substance doit être inférieure à 1 pour pouvoir considérer l'exposition à ces substances chimiques comme tolérables, c'est à dire sans effets sur la santé.

Dans le cas d'une substance sans seuil, le niveau d'acceptabilité du risque varie généralement de 10^{-6} à 10^{-4} selon les pays et les contextes. La circulaire du 12 décembre 1999 du Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, relative aux principes de fixation des objectifs de réhabilitation des sites et sols pollués, conseille de se fixer pour objectif, en première approche, un excès de risque individuel de 10^{-5} , conformément aux recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé.

4 Notion de schéma conceptuel d'exposition

Le schéma conceptuel d'exposition récapitule l'ensemble des voies de transfert et d'exposition pour les populations cibles. Dans le cadre d'une évaluation des risques sanitaires, le schéma conceptuel d'exposition est un des résultats, exprimé sous une forme synthétique, de la phase de caractérisation du site étudié. La figure 1 présente un tel schéma, dans un contexte relativement général.

Cette figure représente les différents compartiments environnementaux susceptibles de contenir, directement ou indirectement, des substances dangereuses suite à la valorisation en infrastructure routière d'un déchet contenant de telles substances. Ces compartiments environnementaux sont par exemple : les sols, les eaux de surface, les eaux souterraines, l'air atmosphérique, l'air du sol, les végétaux, les animaux...

Le schéma conceptuel d'exposition précise également les vecteurs de transfert des substances dangereuses, c'est à dire les chemins par lesquels ces substances transitent entre différents compartiments environnementaux. Les vecteurs de transfert et les compartiments environnementaux sont souvent communs : l'eau par exemple est à la fois un compartiment environnemental (il est nécessaire de connaître les concentrations en substances chimiques dans l'eau pour évaluer le risque lié à la consommation de cette eau) et un vecteur de transfert (car elle peut par exemple véhiculer des substances chimiques à des végétaux ou des poissons ultérieurement consommés par les populations).

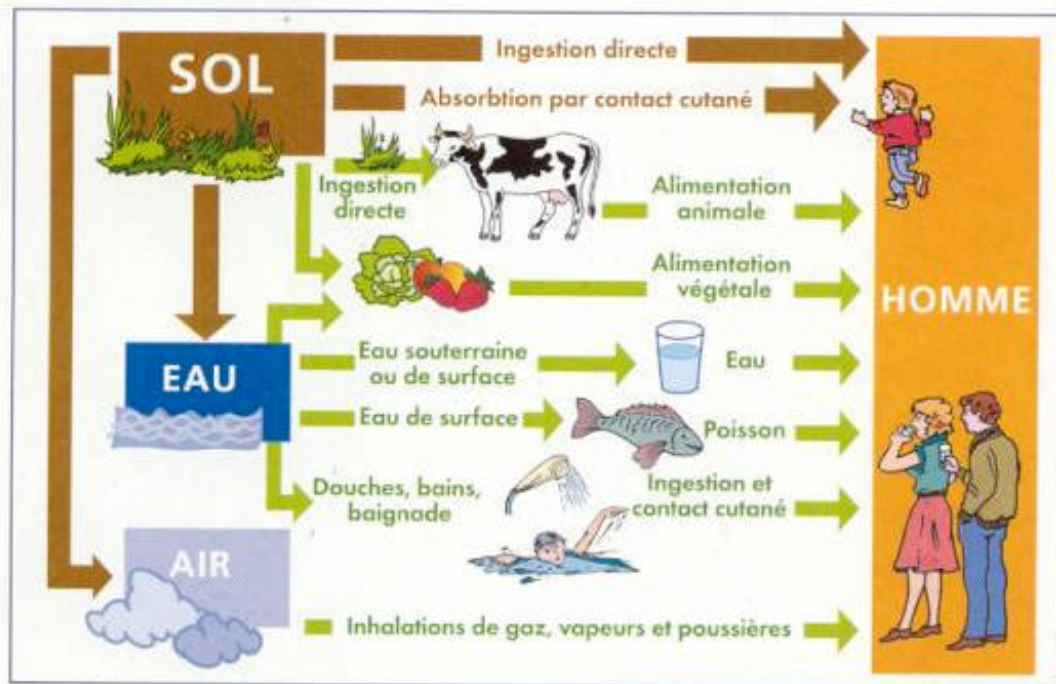


Figure 1. Exemple de schéma conceptuel d'exposition dans un contexte général
Enfin, ce schéma mentionne les voies d'exposition aux substances dangereuses : inhalation, ingestion, contact cutané...

Appliqué à une infrastructure routière ayant valorisé un déchet par exemple mal stabilisé, un tel schéma conceptuel peut se simplifier, car il peut apparaître que certains vecteurs de transferts ou certains compartiments environnementaux ne sont pas pertinents dans ce cas particulier.

5. Cas particulier des risques professionnels

La législation française sur les risques professionnels est abordée à travers plusieurs textes :

- le livre 2 du code du travail expose la « réglementation du travail » de façon générale ;
- un certain nombre de décrets^[1] fournit des valeurs réglementaires destinées à limiter l'exposition à certaines substances spécifiques (amiante, benzène, chlorure de vinyle, plomb...)
- sur les lieux de travail ;
- plusieurs circulaires^[2] (pas ~~toujours parues~~ nécessairement publiées au Journal Officiel) ~~publient-édicter~~ des valeurs limites admises sur les lieux de travail pour un grand nombre de substances potentiellement toxiques, c'est à dire des valeurs d'exposition dont le respect permet d'éviter tout effet adverse.

Il existe également des directives européennes sur le sujet des risques professionnels. Elles portent pour une partie sur la réglementation du travail, et pour une autre partie sur l'établissement de valeurs limites indicatives. Les directives européennes sont en principe ~~reprises-retranscrites~~ dans le droit français.

Dans le contexte des risques professionnels, deux valeurs limites admises dans l'atmosphère de travail ont été retenues : les valeurs limites d'exposition (ou VLE^[21]) et les valeurs moyennes d'exposition (ou VME^[22]). Les définitions reprises par l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS^[23]) en sont les suivantes :

- ~~la-La~~ VLE est la valeur dont le respect permet d'éviter le risque d'effet toxique immédiat ou à court terme. C'est une valeur plafond mesurée sur une durée maximale de 15 minutes, en fonction de la nature du risque, des conditions de travail et des possibilités techniques de mesurage.

- La VME est la valeur destinée à protéger les travailleurs des effets à terme, mesurée ou estimée sur la durée d'un poste de travail de 8 heures. Une VME peut être dépassée sur de courtes périodes, sous réserve de ne pas dépasser la VLE, lorsqu'elle existe.

Cependant, le recours aux VLE et VME dans le contexte d'un chantier d'infrastructure routière soulève plusieurs interrogations sur la validité de cette démarche :

- ~~la-La~~ majorité des VLE et VME sont établies dans le contexte d'une atmosphère de travail en intérieur. Dans quelle mesure l'extrapolation de ces valeurs à une atmosphère en extérieur sur chantier peut-elle être valable ?

- ~~le-Le~~ respect de ces valeurs limites suppose l'existence de systèmes fiables de mesure de la qualité de l'air. Quels seraient les moyens de mesure des concentrations atmosphériques représentatives sur un chantier à l'air libre ?

- Dans l'établissement des valeurs limites, seule la voie respiratoire est prise en compte comme vecteur d'exposition des travailleurs aux substances potentiellement toxiques. Les autres vecteurs d'exposition principaux (du moins dans le cadre d'un chantier en extérieur), comme le contact cutané ou l'ingestion de particules, ne sont pas considérés alors qu'ils peuvent s'avérer plus pénalisants pour certaines substances.

^[1] Par exemple : décret du 07 décembre 1984 relatif aux poussières ; décret du 1^{er} février 1988 relatif au plomb métallique et ses composés ; décret du 10 avril 1997 relatif à la silice cristalline...

^[2] Par exemple : circulaires relatives à la publication des VLE des 19 juillet 1982, 21 mars 1983, 1^{er} décembre 1983, 10 mai 1984, 05 mars 1985, 14 mai 1985, 05 mai 1986, 12 mai 1986, 13 mai 1987, 07 juillet 1992, 12 juillet 1993, 12 janvier 1995, 21 août 1996...

Plans départementaux

Attention : Certains de ces documents sont longs à ouvrir, un peu de patience ! Merci

- [Schéma régional et plans départementaux de gestion des déchets du BTP. Département de Haute-Normandie, l'Eure et la Seine-Maritime.](#)
- [Plan départemental de gestion des déchets de chantier du BTP. Département de la Creuse.](#)
- [Plan départemental pour l'élimination et la valorisation des déchets de chantier du bâtiment et des travaux publics. Département de la Sarthe.](#)
- Déchets du BTP Languedoc-Roussillon. Plans de l'Aude, du Gard, de l'Hérault, de Lozère et des Pyrénéens Orientales : <http://dechetsbtplr.free.fr>

Page: 2

[\[1\] Mettre dans un glossaire](#)

Page: 2

[\[2\] Pourquoi des italiques.](#)

Page: 2

[\[3\] Mettre au glossaire](#)

Page: 2

[\[4\] Glossaire](#)

Page: 2

[\[5\] Glossaire](#)

Page: 4

[\[6\] A revoir en fonction des évènements!](#)

Page: 4

[\[7\] Glossaire](#)

Page: 4

[\[8\] L'amiante généralement ne se trouve pas en filon, mais plutôt en masse dans des roches ultrabasiques!](#)

Page: 4

[\[9\] Glossaire](#)

Page: 5

[\[10\] Glossaire](#)

Page: 5

[\[11\] Glossaire](#)

Page: 7

[\[12\] Glossaire](#)

Page: 7

[\[13\] à bannir!](#)

Page: 7

[\[14\] Pas très clair pour la ponctuation](#)

Page: 7

[\[15\] F pour Français?](#)

Page: 18

[\[16\] Seule l'eau idéale à un pH neutre l'eau déminéralisée n'est pas neutre!](#)

Page: 18

[\[17\] Pas clair!](#)

Page: 18

[\[18\] On ne parle pas de cinétique?](#)

Page: 20

[\[19\] Je serais très prudent à ce sujet, brassage est un peu fort, un homogénéisation oui mais modérée pour éviter les échanges gazeux qui peuvent être responsables de précipitations ou de carbonatation.](#)

Page: 21

[\[20\] Glossaire](#)

Page: 23

[\[21\] Glossaire](#)

Page: 23

[\[22\] Glossaire](#)

Page: 23

[\[23\] Glossaire](#)

Annexe 3

Références

Avertissement :

L'utilisation des deux points doit être revue de manière rigoureuse.

Exemple d'extraction

(au front) à remplacer par (le front de taille)

Différentes classes granulaires

Mettre une majuscule au départ.

Mesure des propriétés

Un petit problème de police dans le texte du troisième pavet.

Références

Résumé

L'observatoire OFRIR met à disposition du public des informations sur des matériaux peu courants utilisables pour la construction des infrastructures routières. A la lecture de ces rubriques, le lecteur peu averti peut logiquement être amené à s'interroger sur les pratiques habituelles dans ce domaine.

La présente rubrique a donc pour objet de présenter les pratiques courantes en matière de matériaux pour terrassements et granulats pour chaussées. Les matériaux évoqués dans cette rubrique sont donc naturels et conformes aux normes et aux spécifications techniques.

Le terme « naturel » couvre les sols et roches qui constituent naturellement l'écorce terrestre, et sont exploités en carrières ou excavés sur les chantiers.

Ces matériaux étant considérés comme inertes, les risques environnementaux et sanitaires sont plus liés à l'activité des carrières (encadrée par une législation stricte) qu'à l'utilisation des matériaux.

Du point de vue géotechnique, plusieurs décennies d'expérience d'utilisation de ces matériaux ont abouti à la constitution d'un référentiel technique très étoffé, regroupant des normes qui codifient ces matériaux et des textes qui spécifient la façon de les utiliser.

La rubrique donne des indications sur le contenu de ces documents, mais ne les détaille pas. En effet, ceux-ci étant des outils de travail quotidiens de tous les praticiens, la majorité des lecteurs de l'observatoire les connaissent ou se doivent de les connaître. Par contre, ces textes sont référencés et pourront donc être trouvés par ceux qui souhaitent y accéder.

Définition

Cette rubrique a pour but de rappeler les règles usuelles d'emploi en travaux publics pour les matériaux et granulats conformes aux *normes* et aux *spécifications* du domaine routier.

Les matériaux et granulats objet de cette rubrique, sont produits à partir des roches et des sols courants. Les techniques utilisées pour la construction des infrastructures routières ont été développées et validées avec ces matériaux et granulats. Parallèlement, certains des procédés de préparation, et d'emploi des matériaux, objet des autres rubriques de l'observatoire OFRIR se sont développés à partir de ces techniques.

D'une façon générale, selon l'usage auquel ils sont destinés, on parlera de :

- « sols » et « matériaux rocheux » (dans le cas d'une utilisation en *terrassements*, c'est à dire en remblais ou couches de forme)
- « granulats » (dans le cas d'une utilisation en couche de *chaussées*).

Cette distinction est liée aux normes qui régissent les travaux dans ces deux domaines d'applications

Textes spécifiques de référence

Sommaire

1. Documents réglementaires

2. Documents techniques

1. Documents réglementaires

Quelques textes réglementaires s'appliquent aux carrières dont un recueil intitulé « Réglementation applicable aux exploitations de carrières », édité par le ~~ministère~~ Ministère de l'Environnement (service Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques), novembre 1996. On se reportera en particulier à la loi afférents aux installations classées pour l'environnement et au décret du 20/05/53 modifié :

- Loi N°76-663 du 19 juillet 1976 relative aux Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE).

Décret du 20/05/53 modifié (dernière mise à jour avril 2002), rubriques 1 :

- N° 2510 (exploitation de carrières) 1

- N° 2525 (broyage, concassage, criblage, ensachage, pulvérisation, nettoyage, tamisage, mélange de pierres, cailloux, minerais et autres produits minéraux naturels ou artificiels) 1

- N° 2517 (station de transit de produits minéraux solides).

Citons également S'applique également à ce domaine le Règlement Général des Industries Extractives, Journal Officiel , 1996.

2. Documents techniques

Deux familles de documents techniques, les *normes* et les *textes de spécification* (définition de règles d'utilisation) doivent être signalées car ces deux derniers sont couramment utilisés et référencés dans le domaine des travaux publics. En effet, l'observatoire OFRIR vise à renseigner sur les matériaux « hors normes » et sur les matériaux « hors spécifications », ce qui recouvre deux notions bien distinctes.

En travaux publics, les matériaux et granulats sont classés selon des critères normalisés, et les règles d'utilisation des classes ainsi définies sont spécifiées par les maîtres d'ouvrages. Les spécifications de loin les plus utilisées sont celles éditées par l'Etat pour le réseau routier national, ce qui n'empêche en rien les autres maîtres d'ouvrages d'éditer leur propres spécifications.

2.1 Normes de classification

Deux normes sont actuellement en vigueur : ~~N~~

- La norme ~~norme~~ XP P 18-540 « Granulats » (AFNOR, 1997) ~~- Cette norme~~ qui définit ce que sont les granulats, en donne les règles de classification usitées en fonction des techniques dans lesquelles ils peuvent être utilisés, ainsi que les règles de contrôle de leurs caractéristiques.

Il est à noter que, dans le cadre de la construction européenne, ce texte unifié disparaîtra en juin 2004 et sera remplacé par une série de nouvelles normes.

~~N~~ La norme NF P 11-300 « Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières » (AFNOR, 1992).

Dans les deux cas, il faut souligner qu'une partie des matériaux présentés dans OFRIR répondent aux critères de ces normes puisque celles-ci prévoient des classes pour des « granulats artificiels » ou « recyclés » (XP P 18-540), et des classes pour les « sous produits industriels » (NF P 11-300). D'autre part, certains matériaux naturels répondant aux critères de ces normes, mais utilisés en dehors des spécifications, sont aussi concernés. On parle d'usage « hors spécifications ».

2.2 Textes de spécifications

On ne traitera ici que de ceux de la Direction des ~~routes~~Routes, ~~ministère~~Ministère de ~~l'équipement~~l'Équipement, qui servent de référence pour l'utilisation de ces matériaux:

- LCPC, SETRA (1981), Manuel de conception des chaussées neuves à faible trafic.
- SETRA- LCPC (2000 2^{ème} édition): guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide Technique D 9233, encore appelé couramment **GTR dans le réseau du ministère de l'équipement**.
- LCPC, SETRA (1994): Conception et dimensionnement des structures de chaussées. Guide Technique D9511.
- LCPC, SETRA (1994): Guide d'application des normes pour le réseau routier national. Enrobés hydrocarbonés à chaud.
- LCPC, SETRA (1997): Guide technique. Enduits superficiels d'usure.
- LCPC, SETRA (1997): Guide technique. Chaussées en béton.
- LCPC, SETRA (1998): Guide d'application des normes pour le réseau routier national. Assises de chaussées.
- LCPC, SETRA (2000) : Traitement des sols à la chaux et / ou aux liants hydrauliques. Guide Technique. appelé **GTS dans le réseau du ministère de l'équipement**.
- MINISTERE DE L'EQUIPEMENT (1997) : Cahier des clauses techniques générales. Fascicule 23. Fourniture de granulats employés à la construction et à l'entretien des chaussées.
- SETRA (1999) : Répertoire des textes réglementaires et techniques- Chaussées, terrassements.

Origine, formation et élaboration

Sommaire

1 Matière première

2 Processus de fabrication

1. Matière première

Les matériaux et *granulats* objet de cette rubrique sont produits à partir des roches et des sols courants :

- Les roches massives en place sont regroupées selon leur mode de formation , magmatiques (volcaniques ou plutoniques), métamorphiques ou sédimentaires. Viennent ensuite des « sous-groupes » liée à leur nature (pétrographique, minéralogique, chimique).
- L'altération de ces roches par les agents atmosphériques (pluie, gel, neige, vent, soleil..) modifie leur structure et leur minéralogie, la désagrégation ainsi effectuée conduisant à la formation de sols à des échelles de temps très variables.
- Enfin, le déplacement des grains de sols (par les rivières essentiellement), puis leur sédimentation conduit à la formation d'autres sols ou roches meubles.

Les **granulats** sont issus de l'exploitation et du traitement des roches (roches meubles dans le cas des granulats alluvionnaires, roches massives dans les autres cas). La norme NF P 18-557 donne des indications sur la nature et la texture [1]des roches utilisables à des fins de production de granulats.

Les **matériaux** pour les terrassements sont des sols (classes A, B, C, D de la norme NF P 11-300) ou des roches (classe R de la même norme).

2. Processus de fabrication.

Cas des matériaux pour terrassement

Bien souvent, les matériaux pour les remblais [2] ou pour les couches de forme [3] sont issus du chantier même où ils sont utilisés dans le cadre des mouvements de terre (déblais – remblais). Dans certains cas, ils peuvent même être utilisés sans réel mouvement par traitement en place à la chaux et/ou aux liants hydrauliques. On entend par traitement en place à la chaux, le

répandage^[4] d'une couche de chaux (la plus fréquemment utilisée), suivi d'un mélange en place avec un engin de terrassement, le tout finalisé par un compactage. La chaux a pour effet de faire baisser la teneur en eau du matériau et de le rendre ainsi plus facile à travailler. Elle peut aussi améliorer dans le temps la portance du sol. Le traitement aux liants hydrauliques est plus particulièrement utilisé pour augmenter les performances du matériau ; il n'est pas spécifique aux terrassements.

Dans le cas de chantiers déficitaires en matériaux ou présentant des matériaux de qualité insuffisante, il est fait appel à des approvisionnements en provenance de carrières ou d'emprunts extérieurs.

Sauf dans le cas des traitements en place, les matériaux font l'objet au minimum d'une extraction (à la pelle, au scrapper ou à l'explosif), et parfois aussi d'une préparation mécanique (criblage avec ou sans concassage).

Cas des granulats

Sauf exception, les granulats sont issus d'installations classées : les carrières. La matière première y fait d'abord l'objet d'une extraction (à la pelle mécanique et / ou par abattage à l'explosif selon la roche), puis d'un traitement (au minimum criblage, au maximum une ou plusieurs étapes de concassage, criblage, lavage).

Certains des procédés de préparation des matériaux faisant l'objet des autres rubriques d'OFRIR se sont développés à partir des techniques existantes. Sont donc rappelés ci-après quelques éléments concernant leur exploitation.

La figure 1 présente un schéma de principe d'installation :

Etape j : concassage primaire (concasseur à mâchoire sur le schéma)

Etape k : concassage secondaire (concasseur giratoire sur le schéma)

Etape l : concassage tertiaire (concasseurs giratoires sur le schéma)

Mâchoire

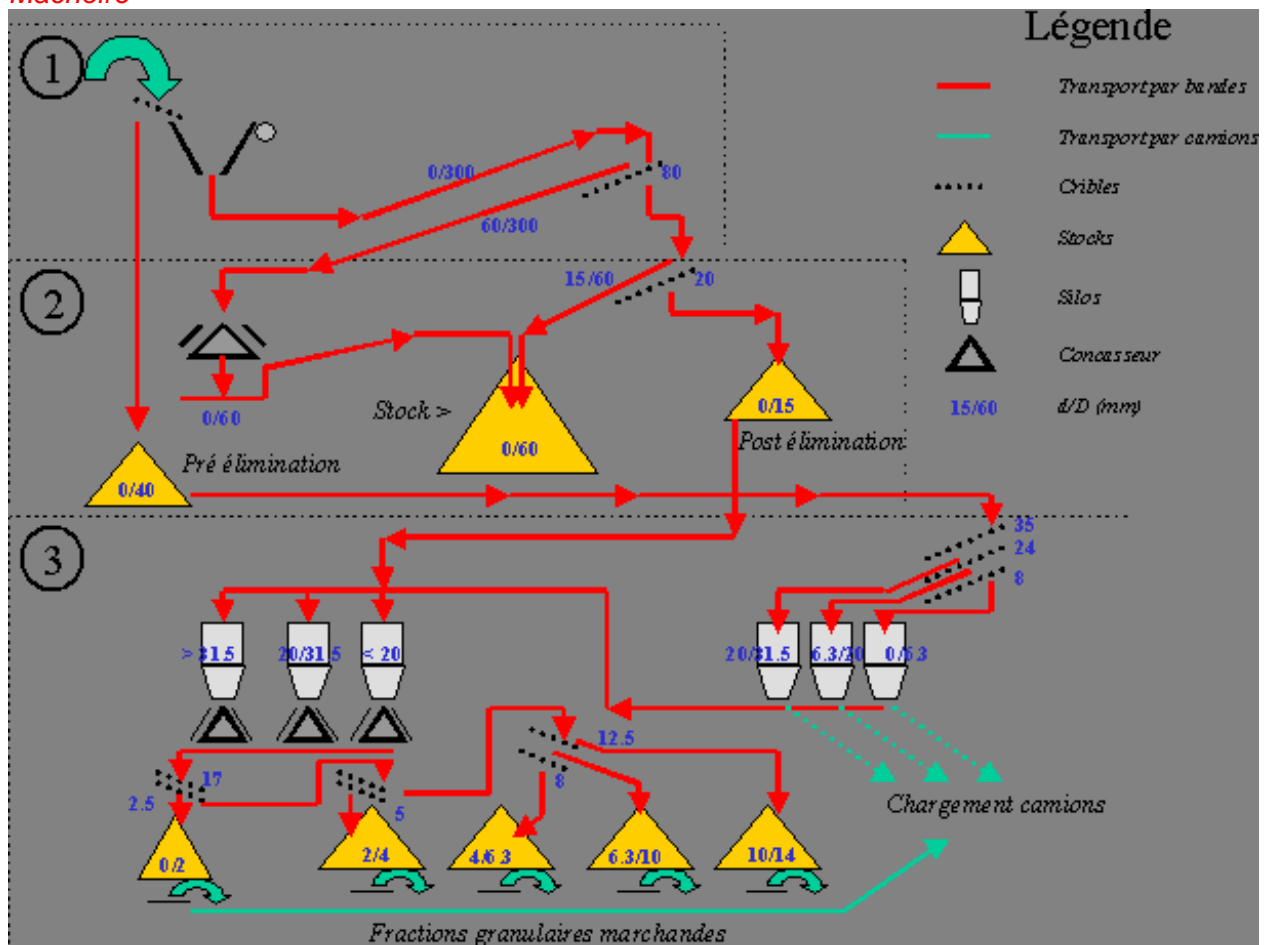


Figure 1 : exemple d'installation et des étapes de fabrication des granulats.

Plus de détails : [Exemples d'extraction de carrières de roches massives.](#)

Plus de détails : [différentes classes granulaires de granulats.](#)

Caractéristiques physico-chimiques

1. Classification

2. Effets physico-chimio-mécanique^[5]

Les caractéristiques physico-chimiques des granulats et matériaux naturels sont liées à leurs ~~compositions pétrographiques et minéralogiques~~ caractéristique texturale et composition minéralogique, ainsi qu'à leur texture^[6]. Ces caractéristiques ont une forte influence sur une partie des propriétés géotechniques des matériaux mais sont rarement évaluées directement par des mesures.

Une roche est constituée d'un assemblage de minéraux. Un minéral est composé d'éléments chimiques organisés selon un réseau cristallin fixe. Il est à noter que les argiles sont des minéraux à part entière.

1. Classification

Du point de vue de la chimie, les principales familles de roches sont:

- **les roches siliceuses acides**- : l'index d'acidité correspond au rapport de la silice sur la somme des cation Si/S cations. Si l'index est > 60% alors la roche est dite acide ou saturée ou baptisée minéral siliceux. Si l'index est compris entre 60% et > 50%, alors la roche ou le minéral est dit neutre.

- Exemples: granite, rhyolite, quartzite, silex, gneiss...

- **les roches silicatées -basiques**- : se dit des roches magmatiques ou métamorphiques pour lesquelles l'index est inférieur à 50%. Le quartz ne cristallise pas. Ces roches sont généralement sombres et denses. Bien que beaucoup plus rares que les précédentes à la surface des continents, elles représentent une source majeure pour la production de granulats.

Exemples : diorite, basaltes, amphibolites...

- **les roches carbonatées** : il s'agit essentiellement des calcaires, roches constituées en majorité de cristaux de calcite (carbonate de calcium). Il est à noter que la présence de minéraux argileux mêlés aux cristaux de carbonates est fréquente. Si les proportions en sont importantes, la roche n'est plus un calcaire mais une marne.

Dans cette classification par familles chimiques, il est à signaler que de nombreux matériaux sédimentaires sont en fait des mélanges de grains de natures pétrographiques (donc chimiques) différentes.

C'est le cas des roches argileuses, qui contiennent souvent des carbonates. C'est aussi le cas des matériaux alluvionnaires, dont la composition pétrographique dépend de la nature des roches présentes dans le bassin versant du cours d'eau considéré ; ces alluvionnaires sont d'ailleurs souvent qualifiés de « silico-calcaires ».

2. Effets physico-chimio-mécanique

Les constituants majeurs des roches que sont la silice, les silicates et les carbonates ont une influence sur le comportement des matériaux, rarement évaluée en tant que telle dans les identifications géotechniques. L'une des influences connue en pratique est une différence d'affinité des granulats vis à vis des liants produisant des différences de comportement.

Dans le cas particulier de *l'alcali-réaction*, la méthode de qualification prévoit des identifications minéralogiques. Concernant les argiles, des essais indirects permettent d'en qualifier les effets.

Les roches peuvent naturellement contenir divers minéraux qui, même en faibles quantités, peuvent avoir des influences négatives sur le comportement, du fait de leurs caractéristiques physico-chimiques. Par exemple, on ne tient pas à utiliser des argiles gonflantes dans les matériaux de chaussée car le gonflement ne permet pas de garantir l'intégrité de l'ouvrage .

Comme autre exemple, on citera les sulfures (notamment la pyrite FeS₂) dont l'oxydation peut engendrer la modification des conditions chimiques du milieu où ils se trouvent (pH), et dont les

répercussions peuvent être des désordres géotechniques aux ouvrages du fait de gonflements dus à la création de nouvelles espèces minérales (de type sulfate). Pour les usages en chaussées béton, il existe d'ailleurs des spécifications sur le dosage maximum admissible pour ces matériaux réactifs.

Caractéristiques géotechniques

1. Caractérisation des matériaux pour terrassements
2. Caractérisation des granulats

Qu'il s'agisse de granulats ou de matériaux destinés aux terrassements, quelques décennies de savoir-faire se sont traduites par la constitution d'un référentiel solide. Dans celui-ci, les matériaux sont classés en fonction de leurs propriétés (normes NF P 11-300 et XP P 18-540), et les règles d'usages des différentes classes ainsi obtenues sont codifiées dans les documents d'application des normes (tels que le GTR), dans les normes de matériaux de chaussées et dans les guides d'application (textes de spécifications) les concernant.

1. Caractérisation des matériaux pour terrassements

Pour les matériaux destinés aux terrassements, la norme NF P 11-300 prévoit plusieurs niveaux d'identifications ~~géotechniques~~ géotechniques. Les matériaux sont d'abord classés selon leur « nature ». Concrètement, les paramètres influents sont le diamètre maximal D_{max} , la *granularité*, l'*activité* des argiles pour les sols meubles, et la nature pétrographique pour les matériaux rocheux. Un second niveau de classement fait intervenir l'état hydrique du sol, c'est à dire sa teneur en eau naturelle comparée à son comportement à différentes teneurs en eau. Pour certains matériaux, d'autres caractéristiques sont prises en compte, comme la résistance mécanique des grains ou la masse volumique.

Les méthodes de mesure de toutes ces différentes caractéristiques sont normalisées.

2. Caractérisation des granulats

Pour les granulats, les propriétés géotechniques sont réparties en deux familles :

- ~~les~~ Les premières sont dites « intrinsèques ». Elles dépendent essentiellement de certaines propriétés physiques des roches. Il s'agit notamment des résistances mécaniques, de la masse volumique des grains, ...

- ~~les~~ Les secondes sont dites « de fabrication ». Il s'agit des paramètres sur lesquels le processus de fabrication en usine a une influence majeure. Le principal d'entre eux est la *granularité*. [7] On citera aussi la *forme* [8] et la *propreté* [9]...

Les essais permettant de mesurer ces caractéristiques sont normalisés. La liste de ces normes fait l'objet d'un paragraphe de la norme générale XP P 18-540 à laquelle le lecteur est invité à se reporter. Un paramètre important que la norme XP P 18-540 impose aux producteurs de granulats est celui de la régularité des caractéristiques des produits qu'ils mettent sur le marché. Des fréquences d'essais et des valeurs limites sont imposées, qui confèrent aux granulats un véritable caractère de produit industriel.

Les propriétés mécaniques des granulats naturels dépendent de leur origine et du traitement qu'ils ont subi entre leur extraction et leur passage à l'état de produit.

Plus de détails : [mesure des propriétés des granulats, dispositifs d'essais.](#)

Caractéristiques environnementales

Sommaire

1. Transfert vers l'air
2. Transfert vers l'eau

La caractérisation environnementale est une première étape à engager dans le cadre d'une réflexion visant à mettre en avant un danger potentiel pour l'homme. Les milieux environnants

directement concernés sont donc l'air, l'eau et le sol en premier lieu. On doit également tenir compte dans une démarche de caractérisation du mode de transport et de transfert de la pollution. Enfin, le contexte particulier lié à une phase de chantier doit également être délimité pour répertorier les interactions possibles entre la réalisation de l'ouvrage, l'environnement et les hommes concernés tels que travailleurs et riverains des ouvrages routiers.

Les granulats extraits des roches et sols ne sont pas a priori nocifs pour l'environnement. Cependant, les étapes d'extraction, de criblage/concassage, de transport et de stockage modifient leurs interactions physico-chimiques avec l'air, l'eau et le sol, pouvant aboutir à des pollutions. Les conditions et la durée des stockages sont déterminantes dans le processus. On rappelle dans les paragraphes qui suivent quelques éléments liés à l'exploitation des matériaux ordinaires.

1. Transfert vers l'air

Les *ultra-fines* sont transportées par l'air, et parfois sur de longues distances, dans le cas de stockages ou transports en milieu sec et exposé aux vents. Cependant, les granulats sont généralement commercialisés sous forme de fractions granulaires, ce qui limite considérablement le phénomène potentiel d'envol de poussières. Plus précisément, les seuls envois susceptibles de se produire concernent les sables et graves (par exemple 0/4, 0/20, ...), au moment du chargement sur le site de la carrière, phénomène atténué par la pluie.

2. Transfert vers l'eau

Très peu de bibliographie est disponible sur ce sujet. Une étude de l'ADEME, ([ADEME, 1996](#)), traite du comportement à la lixiviation de matériaux considérés comme inertes et de produits naturellement exposés à l'action de l'eau. Pour ces derniers, qui concernent les matériaux relatifs à différentes sortes de roches présentant ou non à l'état naturel des teneurs non nulles en éléments jugés toxiques, des essais de lixiviation ont été réalisés. Il s'agit bien de l'essai de lixiviation préconisé par la norme NF X31-210, qui permet d'évaluer le potentiel polluant d'un déchet qui a été broyé préalablement à sa mise au contact de l'eau. Il en ressort que pour les différentes roches lixiviées, les fractions solubilisées sont de l'ordre de cent à mille fois plus faibles que les seuils de concentration fixés par les arrêtés de 1992, modifiés par ceux du 18/02/1994 pour l'admission des déchets ultimes stabilisés en centre de stockage.

Des travaux de l'office international de l'eau (Berland, 1998) font état de *finés* facilement entraînées dans les eaux de ruissellement, provoquant une augmentation importante de la *turbidité*, c'est à dire de la teneur en matières en suspension. Des éléments tels que le fer et le manganèse, contenus dans ces fines, se dissolvent aisément. En cas de contact avec l'oxygène de l'air, ils peuvent aussi précipiter sous forme d'oxydes, que l'on va ensuite retrouver, après *adsorption*, dans les sédiments des eaux de surface.

D'autre part, dans le cas d'une durée de stockage suffisamment longue, et dans des conditions humides, des algues peuvent se développer en utilisant le carbone atmosphérique, le phosphate et le nitrate contenus dans l'eau. Sous les algues mortes, des bactéries *dénitrifiantes* [\[10\]](#) trouvent également un milieu propice à leur développement. De la même manière, des bactéries *sulfato-réductrices* [\[11\]](#) peuvent contribuer à faire diminuer le taux de sulfates et de phosphates [\[12\]](#). Mais ce type de phénomènes sur un stock de matériaux ordinaires en tas n'est pas très différent de ceux qu'on pourrait observer en agriculture.

Aspects sanitaires

On peut signaler que la fabrication des granulats, qui s'effectue dans les usines d'élaboration intégrées aux carrières (installations classées surveillées par les DRIRE), génère des quantités importantes de poussières (souvent siliceuses) ; celles-ci sont généralement confinées dans les installations, voire récupérées par filtration de l'air. La protection des travailleurs est assurée d'après la réglementation du travail.

En amont dans la carrière, les eaux de lavage de carrière sont traitées voire recyclées dans l'installation de sorte que le pH de l'eau qui est rejetée dans le réseau superficiel ne soit pas préjudiciable au milieu.

Les sols et roches naturels sont considérés généralement comme inertes, car soit exempts d'éléments polluants, soit contenant des éléments polluants très peu solubilisables. Lorsqu'ils sont incorporés dans des infrastructures routières, ils ne présentent donc pas de risques sanitaires à l'utilisation vis à vis de l'eau et du sol, en particulier pour ce qui concerne les métaux .

Le stockage temporaire des granulats hors des carrières peut, par exemple avant l'emploi dans des centrales d'enrobage, être réalisé à l'abri, dans le but de maintenir une faible teneur en eau avant utilisation. Leur manutention à ce stade ne fait pas l'objet d'une protection particulière des travailleurs qui les manipulent.

Utilisation dans les infrastructures

1. Utilisation en remblais et couches de forme.
2. Utilisation en couches de chaussées.

L'emploi des matériaux en terrassements et techniques routières est encadré par des normes, ainsi que par des documents d'application des normes qui font référence dans la communauté technique. L'objet de ce paragraphe est simplement de rappeler leur articulation, en citant ces documents, ~~de rappeler leur articulation~~.

1. Utilisation en remblais et couches de forme.

Les matériaux utilisables en terrassements font l'objet d'une classification. Celle-ci est normalisée (NF P 11-300) et s'appuie sur les caractéristiques géotechniques des matériaux.

L'utilisation des diverses classes de matériaux ainsi délimitées est codifiée dans deux documents, qui sont respectivement le « Guide Technique pour la Réalisation des Remblais et des Couches de Forme » (connu sous l'abréviation GTR), et le « Guide Technique pour le Traitement des Sols à la Chaux et / ou aux Liants Hydrauliques » (connu sous l'abréviation GTS).

Pour chaque classe et sous-classe de matériaux, ces documents précisent les modalités d'extraction et de mise en œuvre. Ils précisent aussi les possibilités et les conditions de traitement (actions sur la granularité, sur la teneur en eau, ou amélioration par apport de chaux et ou liants) visant à faciliter les opérations de mise en ~~œuvre~~, œuvre, et qui conduisent dans certains cas à améliorer les caractéristiques mécaniques des matériaux.

Il faut souligner que, pour des utilisations en remblais, pratiquement tous les types de sols et matériaux rocheux naturels sont utilisables sous une condition ou une autre. Les seules restrictions concernent leur état hydrique, à savoir qu'ils peuvent être considérés comme « inutilisables en l'état » s'ils sont trop secs ou trop humides. En revanche, dans le cas des couches de forme, aux restrictions liées aux états hydriques s'ajoute l'exclusion de certaines natures de matériaux, en particulier les « A₄ », « C_xA₄ » [13] (matériaux excessivement argileux), ainsi que certains matériaux rocheux.

A noter que le GTR a succédé à un document antérieur, connu sous le nom de Recommandation pour les Terrassements Routiers (R.T.R.), qui a été en vigueur de 1976 à 1992.

2. Utilisation en couches de chaussées.

De même que pour les matériaux pour terrassements, les granulats pour couches de chaussées font l'objet d'une classification. Celle-ci est normalisée (XP P 18-540) et s'appuie d'une part sur le type d'usage prévu pour le granulat, et d'autre part sur les caractéristiques géotechniques des granulats.

Ainsi, la norme prévoit une classification pour les granulats destinés aux assises de chaussées (§ 7 de la norme), une autre s'ils sont destinés à des couches de roulement bitumineuses (§ 8), et une autre encore pour les utilisations en chaussées béton (§ 9).

L'utilisation des diverses classes de matériaux ainsi délimitées est codifiée pour le réseau routier national dans des documents d'application suivants (documents regroupés sous SETRA, 1999) :

~~le~~Le guide « Assises de chaussées », dans lequel les tableaux 4, 6 et 7 donnent les spécifications en fonction des trafics routiers visés, pour des utilisations en techniques non traitées (G.N.T.) ou traitées aux liants hydrauliques (GTLH, STLH) ;

~~le~~Le guide « Enrobés hydrocarbonés à chaud », dans lequel les tableaux 5, 6 et 7 donnent les spécifications en fonction des trafics routiers visés, pour des utilisations selon les différentes techniques bitumineuses pour couches de roulement ou d'assises ;

~~le~~Le guide technique « Chaussées en béton », dont le § 4.1.1 précise les conditions de choix des granulats pour les techniques concernées ;

~~le~~Le guide technique « Enduits superficiels d'usure », dont le paragraphe 1.A. précise les conditions de choix des granulats pour les techniques concernées.

Il est à noter que le § 2.B de ce document donne des indications sur la façon d'apprécier l'adhésivité liants - granulats.

Il faut aussi remarquer que ~~A noter que~~, pour leurs parties relatives aux granulats, ces documents remplacent une Directive antérieure de la Direction des Routes, qui était en vigueur depuis 1984, intitulée « Spécifications relatives aux granulats pour chaussées ».

Si les documents cités ci-dessus sont de loin les références les plus utilisées par les divers maîtres d'œuvre et d'ouvrages pour fixer les spécifications des marchés, rien n'empêche ces derniers de fixer d'autres spécifications. Ainsi, Scétauroute a fixé ses propres références dans son « Manuel de conception des chaussées d'autoroute » (SCETAUROUTE, 1994). Il faut aussi mentionner un certain nombre de « guides pour l'utilisation des matériaux locaux » édités par quelques régions (exemple : le Guide technique régional Ile de France, calcaires) dans lesquels des spécifications particulières à une ressource donnée sont proposées, et peuvent donc servir de référence aux maîtres d'ouvrage qui le souhaitent.

Sources sur le territoire français

Sommaire

1. Cas des matériaux pour terrassements
2. Cas des granulats

Les matériaux naturels sont, par définition, présents sur tout le territoire. Cela dit, tous n'ont pas une qualité suffisante pour être utilisables en remblais ou couches de forme, et a fortiori comme granulats. La ressource disponible en granulats de certains départements est présentée dans les Schémas Départementaux de Carrière, documents publics consultables dans les préfectures de ces départements.

1. Cas des matériaux pour terrassements

Sur un chantier donné, la première ressource à examiner, ce sont les matériaux du chantier lui-même, donc la ressource locale, qui peut faire l'objet de traitements en place ou de mouvements de terre.

Dans le cas d'un chantier déficitaire en matériaux (et/ou si la qualité de ceux du site est déclarée insuffisante à l'issue de l'étude géotechnique), l'apport extérieur se fait à partir d'emprunts (quantités limitées), ou plus souvent de carrières.

Dans ce dernier cas, les matériaux sont généralement issus des zones altérées des gisements (découverte) ou de l'élimination de la fraction « fine » aux premiers stades de l'élaboration des granulats. Les matériaux ainsi obtenus ont une qualité suffisante pour répondre aux spécifications « terrassements », et leur utilisation participe ainsi à l'économie des zones « nobles » des gisements.

2. Cas des granulats

Dans le vocabulaire technique courant, les granulats se répartissent en trois grandes familles :

~~les alluvionnaires~~ (issus des lits majeurs ou des terrasses des cours d'eau, ainsi que du prolongement en mer de ces cours d'eau pour les « granulats marins ») ;

~~les calcaires~~ (issus de l'exploitation des roches sédimentaires du même nom) ;

~~les éruptifs~~ (issus de l'exploitation des roches magmatiques, mais auxquels se rattachent aussi les granulats issus de l'exploitation des roches métamorphiques, ainsi que de celle de certaines roches sédimentaires siliceuses comme les grès).

La répartition sur le territoire des carrières produisant l'une ou l'autre de ces trois familles de granulats dépend de la géologie (Maillot, 2001) :

- Les régions géologiques susceptibles de produire des granulats « éruptifs » sont le Massif armoricain, le Massif Central, les Vosges et la Corse.

- Les granulats calcaires proviennent de certaines zones des bassins sédimentaires du Bassin parisien, du Nord et de l'Est du Bassin aquitain, du Jura, des marges sud du Massif Central, ainsi que du massif sédimentaire ancien ardennais (Ardennes, Nord, Pas de Calais).

- Les granulats alluvionnaires sont présents un peu partout. Cependant, il faut souligner que dans bien des régions où les formations géologiques encaissantes ne comptent pas de roches massives de qualité, ils sont la seule source locale de granulats.

- Enfin, les zones de montagne (Alpes, Pyrénées, Provence) bénéficient d'une géologie suffisamment variée pour que les trois familles de granulats y soient représentées.

Il est à noter que, pour diverses raisons (épuisement de gisements, mesures légales diverses, politiques volontaristes d'économie des ressources naturelles), la tendance nationale depuis une dizaine d'années est à la réduction progressive de la production des granulats alluvionnaires, au profit des calcaires et des éruptifs (source UNICEM).

~~D'où~~ Pour conclure on peut citer les éléments récapitulatifs ~~suivants~~ (donnés par Arquié et Tourenq (~~1990~~), ~~et~~ Maillot (~~2001~~)) :

- Pour les roches alluvionnaires

Pour Les roches alluvionnaires

La proximité des lieux de consommation, le large éventail des qualités et les coûts de production modérés expliquent le développement historiquement important de l'exploitation de ces matériaux et la place importante qu'ils occupent aujourd'hui dans le marché des granulats. En 2000 (source UNICEM), la production était de 183 millions de tonnes, soit 45 % du marché Français.

Granulats concassés calcaires

- La plupart des granulats concassés calcaires ~~calcaires~~ sont dans l'ensemble de bons matériaux. En 2000 (source UNICEM), la production était de 102 millions de tonnes soit 25 % du marché Français.

Granulats concassés éruptifs

- Les granulats concassés éruptifs éruptifs sont des constituants de choix pour les techniques routières ainsi que pour le ballastage des voies ferrées. En 2000 (source UNICEM), la production était de 122 millions de tonnes, soit 30 % du marché national.

Emplois répertoriés

Les matériaux et granulats naturels sont utilisés partout sur le territoire français. Dans le cas des terrassements, ils le sont de préférence dans des chantiers à proximité des gisements de manière à minimiser les transports. Dans le cas des granulats, selon les usages, il arrive que des produits voyagent sur des distances assez importantes (exemple des granulats pour couches de roulement de chaussées pour lesquels les exigences qualitatives font que des régions entières en sont dépourvus, rendant les approvisionnements lointains obligatoires).

Recherches en cours

Au niveau du Réseau des Laboratoires des Ponts et Chaussées, une opération de recherche est en cours, intitulée « Propriétés des granulats influençant le comportement des mélanges » (période 2001-2004).

Bibliographie [\[14\]](#)

ADEME, 1996. Comportement à la lixiviation de matériaux considérés comme inertes et de produits naturellement exposés à l'action de l'eau. ADEME (Ed), Angers, France, 24p.

XP X 31-210, 1998, annulé le 20/12/02. Déchets – Essai de lixiviation, AFNOR (Ed), Paris, France, Norme française, 16 p.

Remplacé par :

NF EN 12457-2, 2002. Caractérisation des déchets. Lixiviation- Essai de conformité pour lixiviation des déchets fragmentés et des boues. Partie 2 : essai en bâchée unique avec un rapport liquide-solide de 10 l/Kg et une granularité inférieure à 4 mm (sans ou avec réduction de la granularité). AFNOR (Ed), Paris, France, Norme française, 29 p.

NF P 18-557, 1990. Granulats. Eléments pour l'identification des granulats, AFNOR (Ed), Paris, France, Norme française, 8 p.

Arquié G., Tourenq C., 1990 . Granulats. Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées (Ed), Paris, France, 717 p.

Berland J.M., 1998. Synthèses rapides, Impact sur l'environnement de l'extraction des granulats. Office International de l'Eau (Ed), Recueil AE-31, 17 p.

L.R.E.P., UNICEM Ile-de-France, 1996. Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-de-France – Les calcaires. Studio IAURIF (Ed), Paris, France, 40 p.

Maillot R., 2001. Mémento technique des granulats. Les Presses de l'École des Mines de Paris (Ed), Paris, France, 166 p.

Caroff G., Layerle E., Le Caignec H., Spagnol A., 1994. Manuel de conception des chaussées d'autoroutes. SCETAUROUTE (Ed), 3^{ème} édition, France, 113 p.

Page: 3

[\[1\] Glossaire](#)

Page: 3

[\[2\] Glossaire](#)

Page: 3

[\[3\] Glossaire](#)

Page: 4

[\[4\] Glossaire, répandage? Ou épandage?](#)

Page: 5

[\[5\] Pas très heureux!](#)

Page: 5

[\[6\] Il existe une relation intime entre la composition minéralogique et chimique et la composition pétrographique.](#)

Page: 6

[\[7\] Glossaire](#)

Page: 6

[\[8\] Glossaire](#)

Page: 6

[\[9\] Glossaire](#)

Page: 7

[\[10\] Glossaire](#)

Page: 7

[\[11\] Glossaire](#)

Page: 7

[\[12\] Pourquoi?](#)

Page: 8

[\[13\] Préciser dans un glossaire ou une note infra-paginale.](#)

Page: 11

[\[14\] La Biblio doit être homogénéisée et la même pour tout les dossiers du site.](#)

Annexe 4

Matériaux de démolition

Avertissement

Eviter de mettre des crochets à la place des parenthèses pour la bibliographie citée.

Matériaux de Démolition

Résumé

On traite dans cette rubrique des matériaux « blancs » recyclés, c'est à dire des granulats obtenus par récupération de *graves* non traitées, ou par concassage de matériaux hydrauliques routiers ou de bétons. Ces derniers peuvent provenir de bâtiments ou d'ouvrages de génie civil. Les matériaux bitumineux sont abordés dans une autre rubrique.

Après la démolition des structures d'origine, les matériaux sont triés (visuellement), en écartant les lots pollués par des matériaux tels que le bois ou le plâtre. Ils passent généralement par des plates-formes de regroupement et de tri et sont ensuite concassés, criblés et déferrailés, plus rarement lavés. On obtient en bout de chaîne des matériaux de précriblage, des graves non calibrées, des graves 0/D ou des fractions granulaires calibrées. Seules les deux dernières catégories peuvent être utilisées en assise de chaussée (traitées ou non aux liants hydrauliques), les deux premières étant réservées aux emplois en remblai ou en plate-forme.

Les caractéristiques géotechniques des matériaux blancs recyclés conduisent à leur classification en catégorie F7 selon la norme NF P 11 300 (utilisation en terrassement), et en catégorie E ou D selon la norme granulats XP P 18540. La valeur de bleu et la teneur en sulfates doivent être notamment surveillées, suivant les usages prévus, afin d'éviter l'apparition de gonflements. La mise en œuvre doit en outre tenir compte des coefficients d'absorption d'eau élevés, et du caractère frottant et fragile des granulats recyclés.

Peu d'études sont disponibles sur leur comportement environnemental, qui peut se traduire, selon leur composition chimique et leur type d'emploi, par des relargages de sulfates et/ou par une légère alcalinisation du milieu.

Environ 9 millions de tonnes de matériaux blancs recyclés sont utilisées en France annuellement (données SNPGR, 2002), dont plus de 60 % en Ile de France. Les caractéristiques d'usage des bétons recyclés sont couvertes par les normes en vigueur, tant pour un usage en terrassement qu'en assises routières. Trois guides régionaux définissent des règles d'usage (Ile de France, Haute-Normandie et Rhône-Alpes).

Définition

Les chantiers de construction et de démolition du BTP^[1] génèrent une grande diversité de déchets. Alors que certains d'entre eux, en particulier les déchets minéraux, pourraient être réutilisés après tri ou traitement particulier dans la construction d'infrastructures routières, aujourd'hui environ 90% des déchets du bâtiment sont éliminés en décharge (33% pour les TP)

Ce faible taux de réemploi résulte des faits suivants :

- Les procédés de démolition génèrent en général des déchets en mélange donc hétérogènes.
- Le recyclage impose des contraintes de tri et de collecte.
 - Les gisements sont dispersés ce qui induit un coût de transport entre les bassins de production et les bassins d'emploi.

Les pratiques actuelles de sélection et de valorisation amènent à traiter à part :

- Les bétons de démolition de bâtiments ou d'ouvrages d'art ;

- Les matériaux issus de démolition de couches de chaussée en grave non traitée et en matériaux traités aux liants hydrauliques ;
- Dans certaines régions, les sols sous chaussée et les déblais de tranchées présentant de bonnes caractéristiques de propreté, qui permettent de les introduire dans les mêmes circuits de recyclage.

Après traitement approprié, ces produits peuvent être assimilés, en fonction de leurs caractéristiques intrinsèques et de fabrication, à des matériaux de précriblage, graves non calibrées, graves 0/D, sable, gravillons ou cailloux. Ils peuvent alors être utilisés pour les terrassements routiers et dans les couches de chaussées.

Les matériaux « recyclés tout venant » obtenus à partir de divers matériaux concassables (briques, tuiles, ...) ne relèvent pas de cette fiche.

Textes spécifiques de références

Sommaire :

1 Réglementation

2 Normes

3 Textes de spécification technique

1 Réglementation

[Les déchets de matériaux de construction sont classés dans la rubrique 17. du décret n°2002-540 du 18/04/2002](#) qui transpose en droit français la décision de la Commission Européenne 2000/532/CE du 3 mai 2000, modifiée par les décisions 2001/118/CE du 16 janvier 2001, 2001/119/CE du 22 janvier 2001 et 2001/573/CE du 23 juillet 2001.

Les bétons de démolition et les matériaux minéraux naturels relèvent respectivement des codes 17 01 01 et 17 05 03 de cette classification et sont des « *déchets inertes* » vis à vis de la mise en décharge (guide d'avril 2001 du ministère en charge de l'environnement).

[La circulaire MATE/MELT du 15 février 2000 décrit la mise en place d'une planification de la gestion des déchets de chantier du bâtiment et des travaux publics \(BTP \).](#)

La circulaire fixe les objectifs de la planification :

- assurer le respect de la réglementation, faire appliquer le principe « pollueur-payeur » et lutter contre les dépôts sauvages ;
- mettre en place un réseau de traitement-valorisation géographiquement équilibré, offrant un service de proximité pour réduire les transports et ainsi les coûts de gestion des déchets ;
- impliquer le secteur du BTP dans la réduction à la source ;
- développer la *valorisation*, le *recyclage* afin de diminuer la mise en décharge ;
- développer en aval l'utilisation de matériaux recyclés afin d'assurer des débouchés pérennes et aussi d'économiser les ressources en matériaux non renouvelables ;
- mieux impliquer les maîtres d'ouvrage, notamment publics, dans la gestion des déchets, avec la prise en compte systématique du coût de la gestion des déchets dans les appels d'offre.

La circulaire décrit la démarche pour atteindre ces objectifs : des plans départementaux de gestion des déchets de chantiers du bâtiment et des travaux publics doivent être élaborés. Animée par l'Etat, la planification, dans une logique volontaire et consensuelle, associe l'ensemble des acteurs concernés : maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvre, entreprises et industriels.

Les plans doivent contenir :

- la quantification des déchets de chantiers et, si possible, les filières matériaux ;
- le recensement des filières de traitement existantes et prévues ainsi que leurs capacités ;
- la détermination des installations nouvelles nécessaires (nombre et capacité minimale), dans une logique de proximité :-telles que- plates-formes de regroupement et de tri, installations de concassage/recyclage, décharges pour déchets inertes...
- un bilan de la gestion des ressources en matériaux et du recours aux matériaux recyclés.

Ces plans ne peuvent avoir une valeur juridique, contrairement aux plans traitant des déchets ménagers et assimilés, même s'ils sont annexés à ces derniers. Ils doivent être acceptés par les préfets.

[La circulaire MATE/MELT du 18 juin 2001 relative à la gestion des déchets du réseau national](#) donne les instructions aux services de l'Etat pour appliquer la loi du 1-3 juillet 1992 (92-646) relative à l'élimination des déchets ; elle précise également les conditions de collaboration entre les services et les partenaires que sont les autres gestionnaires de réseaux routiers, producteurs et consommateurs de déchets.

Les Directions Départementales de l'Équipement (DDE) doivent dans leur département :

- établir un inventaire des déchets issus du réseau routier national, comportant un état des lieux ainsi qu'une analyse qualitative et quantitative des déchets produits et de leur réutilisation possible ;
- proposer une politique de gestion de ces déchets, conforme à la loi, en tenant compte de l'ensemble des productions et besoins, internes et externes, en matériaux recyclés.

L'annexe I de la circulaire donne un inventaire sommaire des déchets (classés en fonction des activités de gestion de la route) et indique « leurs potentialités de valorisation ». Les bétons et graves traités aux liants hydrauliques sont classés dans l'activité : la construction, et démolition, le gros entretien de ~~chaussées~~ chaussées. Les usages listés sont : ~~la~~ valorisation avec précaution et la vérification ~~des de la présence de~~ DIS (Déchets Industriels Spéciaux).

Cette annexe est issue de la note d'information SETRA n°63 avril 2000 de la collection « économie, environnement, conception » relative à la gestion des déchets de construction et d'exploitation liés à la route. Cette note récapitule la réglementation, les obligations et interdictions, les pratiques de gestion des déchets de la route et les caractéristiques induisant des non conformité ainsi que les pistes possibles.

2 Normes

Les granulats issus de bétons recyclés sont utilisés dans les infrastructures routières pour constituer des remblais, des couches de forme, et en tant que constituants de matériaux pour couches de chaussées.

La norme NF P 11-300 définit une classification des matériaux utilisables en remblais et couches de forme. Elle introduit les sous-produits industriels ; les matériaux de démolition sont classés dans la famille F7. Vis-à-vis de leur réemploi, les paramètres à considérer sont la qualité du déferrailage et de l'homogénéisation, la présence d'éléments indésirables (plâtre, bois ...), et la granulométrie. Les usages techniques des « bétons recyclés » dans les terrassements routiers (voir § 6 : « caractéristiques géotechniques » et § 7 « utilisation dans les infrastructures routières ») se font en les assimilant à des matériaux naturels, et ce en appliquant les classifications données dans la norme et les recommandations données dans le guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme GTR, SETRA-LCPC, 2000 2nd édition.

La norme XP P 18 540 établit une définition des granulats et donne des classes de spécification et de conformité pour les principaux usages, en particulier pour les matériaux routiers. Elle introduit les granulats recyclés dans la définition. Le système de classification ne différencie pas les granulats naturels des granulats dits « artificiels ».

3 Textes de spécification technique

Des expertises locales se sont développées à partir d'expériences, d'études en laboratoire et de chantiers expérimentaux. Elles permettent un usage qui tient compte des particularités de comportement géotechnique des matériaux issus du recyclage, et de l'adaptation nécessaire de réglementations et de recommandations techniques établies au départ pour des matériaux naturels.

Des documents régionaux capitalisent ces travaux :

· « Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-De-France : les bétons et produits de démolition recyclés », décembre 2001.

· Monographie intitulée « Utilisation des matériaux de Haute-Normandie : Sous produits industriels et matériaux divers », mars 2000. [2]

· « Guide technique pour l'utilisation des bétons recyclés de la région Rhône Alpes » (Document en préparation).

Le premier document décrit le contexte des matériaux issus de bétons recyclés en Ile de France ~~:-dont la~~ provenance ~~et l'~~élaboration. Il introduit une classification fondée sur les caractéristiques géotechniques. Pour ces classes de produit, il propose des utilisations pour les travaux de construction de chaussée, tout en précisant les particularités d'emploi.

Le second traite de sous-produits industriels et de matériaux divers pouvant se substituer aux granulats naturels dans la construction routière ou le génie civil. Un chapitre est cependant consacré aux « Matériaux de démolition recyclés » et entre donc dans le cadre de la présente rubrique. Ce dernier récapitule leur origine, la réglementation, les gisements, les caractéristiques géotechniques et physico-chimiques ; il envisage aussi des utilisations pour les terrassements, les chaussées et le remblayage de tranchées, tout en rappelant les méthodologies d'études.

Origine, formation et élaboration

La valorisation des bétons et matériaux de chaussées recyclés dans la construction d'infrastructure routière implique qu'une sélection et un tri soient effectués afin d'éliminer les éléments indésirables, qui nuiraient aux caractéristiques géotechniques du produit recyclé. Ils peuvent être réalisés directement sur le site de démolition, ou après acheminement des matériaux vers des plates-formes de regroupement et de tri. Les procédures de tri reposent essentiellement sur des analyses visuelles.

Pour le traitement préalable à une réutilisation, deux types de dispositions sont pratiqués :

- Soit les matériaux sont orientés vers des installations de recyclage. Ces dernières sont dotées de postes fixes permettant de traiter les produits de démolition. En général, grâce à une gestion appropriée des stocks de matériaux « bruts », ces installations produisent des matériaux dont les caractéristiques sont assez constantes dans le temps. Leur capacité est généralement comprise entre 70 000 et 500 000 tonnes par an ;
- ~~—~~ Soit un poste mobile est acheminé et installé sur la plate-forme de regroupement, voire directement sur le chantier de démolition. Les caractéristiques des productions sont alors fonction des gisements. En général ces postes sont de moindre capacité, environ 70 000 tonnes par an.

Parfois les postes mobiles sont utilisés directement à proximité du gisement.

Les installations de recyclage d'une puissance supérieure à 200 kW sont soumises à autorisation ; de 40 à 200 KW, elles sont soumises à déclaration au titre des installations classées.

Cinq étapes majeures permettent d'élaborer des granulats recyclés :

- Une sélection (ou tri) visuelle du lot. Cette sélection peut intervenir sur le site de démolition, ou à l'arrivée sur les plates-formes de regroupement ou de recyclage. Elle consiste à refuser les lots jugés trop riches en éléments indésirables : bois, plâtre, brique, isolant, papier... La sélection est primordiale pour obtenir des matériaux recyclés homogènes et propres à des emplois dans la ~~route--route~~.

- Une réduction primaire au brise roche pour réduire les plus gros éléments et extraire mécaniquement le ferrailage. Au cours de cette phase, un contrôle visuel des matériaux, et un second tri peuvent être ~~opérés--opérés~~.

- Un concassage primaire avec des concasseurs à mâchoires ou à percussion, afin de réduire les gros éléments et d'obtenir ainsi des matériaux dont la taille n'excède pas 100 à 150 mm. Le système d'alimentation peut être équipé d'un scalpeur [3] afin d'éliminer la

fraction fine. Le type de concasseur influe sur la granularité^[4] du produit en ~~sortie-sortie~~. Si les concasseurs à mâchoires permettent de traiter des blocs volumineux, la réduction de la granularité ~~e~~ est plus faible qu'avec un concasseur à ~~percussion-percussion~~^[5].

- Un déferrailage par un séparateur électromagnétique^[6], le plus souvent de type « overband ^[7] »;

- Un criblage et un tri manuel pour éliminer les impuretés résiduelles;

Ces opérations s'accompagnent éventuellement d'un concassage secondaire sur la fraction supérieure issue du concassage primaire afin de réduire la granularité du matériaux – en particulier en cas d'utilisation d'un concasseur primaire à mâchoires - et plus rarement un traitement par des dispositifs d'épuration afin d'éliminer les impuretés légères (lavage, tables densimétriques, ...).

Les produits issus de ces traitements (Figure 1) peuvent être assimilés, en fonction de leur caractéristiques intrinsèques et de fabrication, à des matériaux de précriblage, graves non calibrées, graves 0/D, sable, gravillons ou cailloux. Ils peuvent alors être utilisés pour les terrassements routiers et dans les couches de chaussées.



Figure 1 : Matériaux en production (source :Yprema).

Caractéristiques physico-chimiques

Etant donné leur origine, les granulats de bétons recyclés sont considérés comme des granulats artificiels. Ils sont essentiellement composés de granulats naturels, de pâte de ciment durcie ou de liants hydratés.

o Les granulats naturels proviennent de deux ~~sources-sources~~, les carrières de roches massives, les gisements alluvionnaires et ceci à partir de trois natures de roches :

- éruptives : granites, basaltes porphyres
- sédimentaires : calcaires, grès, quartzites
- métamorphiques : gneiss, amphibolites.

Les compositions chimiques font apparaître 3 familles :

- les roches calcaires composées presque uniquement de carbonate de calcium (CaCO_3)
- les roches siliceuses formées principalement de quartz (SiO_2) et d'aluminosilicates.

· les roches silico-calcaires qui se rapprochent selon leur teneur en calcaire de l'une ou l'autre des familles précédentes.

o La pâte de ciment durcie: c'est le liant des bétons d'ouvrage de génie civil et de bâtiment, des chaussées en béton, des couches de chaussées en grave ciment. Les ciments normalisés (NF EN 197-1) utilisés sont des mélanges associant principalement et dans des proportions variables du clinker broyé après addition de gypse, et des ajouts de charges minérales. Parmi celles-ci, on trouve des cendres volantes, des fumées de silices, des pouzzolanes naturelles, des fillers calcaires, voire d'autres fillers minéraux. Les ciments peuvent aussi contenir des schistes calcinés, du sulfate de calcium et des additifs.

Le clinker est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux CaO avec la silice SiO₂, des oxydes d'aluminium Al₂O₃, et de fer Fe₂O₃. Sont présents également, mais en moindre quantité, les éléments suivants : MgO, SO₃, K₂O, Na₂O, TiO₂.

o Les liants hydratés, parmi ceux utilisés habituellement pour les couches de chaussées : liants routiers, laitiers pré-broyés, plus rarement et dans certaines régions cendres volantes siliceuses ou calciques, et pouzzolanes.

Au cours de la fabrication des bétons, des adjuvants sont ajoutés afin de faciliter leur mise en œuvre ou améliorer le comportement à long terme. Certains de ces adjuvants demeurent dans les granulats de béton concassé. Par ailleurs, les bétons peuvent contenir des granulats et des sables susceptibles de générer des phénomènes d'alcali réaction.

Les impuretés potentielles

Les bétons et matériaux de chaussée recyclés peuvent être « contaminés » par des éléments provenant essentiellement du milieu environnant l'ouvrage dont ils sont issus.

Les matériaux recyclés provenant de bâtiments peuvent présenter des pollutions issues des parements du béton : plâtre, peinture, papier peint..., et du milieu environnant le bâtiment dont ils proviennent : produits fabriqués ou stockés dans le bâtiment, terre, sols, d'où l'intérêt du tri.

Les sulfates provenant des plâtres en mélange dans les matériaux recyclés sont particulièrement préjudiciables. Des teneurs élevées empêchent leur utilisation en technique routière, car les sulfates peuvent engendrer des gonflements par formation d'ettringite, entraînant ainsi la dégradation prématurée de la chaussée. La teneur en sulfate est mesurée conformément à la norme XP P 18 581 ; le seuil retenu dans le guide technique d'Ile de France est de 0,7 % pour l'utilisation en couche de forme ou en couche de chaussée.

Les matériaux issus de démolition de chaussée peuvent être aussi « contaminés » par les sols d'accotement ou de support, et par des ions chlorures provenant des sels de déverglaçage.

Caractéristiques géotechniques

Sommaire :

1 Les caractéristiques intrinsèques

2 Les caractéristiques de fabrication

Les différentes productions issues du recyclage des bétons et des matériaux de chaussée (naturels ou traités aux liants hydrauliques) sont fonction de la gestion des matériaux bruts, et du mode d'élaboration, en particulier du concassage. Elles peuvent être classées en cinq catégories vis-à-vis de leur emploi possible en technique routière et selon leur granularité :

- matériaux de pré-criblage et grave non calibrée ;
- grave 0/D avec $6,3 \text{ mm} < D = 31,5 \text{ mm}$;
- sable 0/D avec $1 \text{ mm} < D = 6,3 \text{ mm}$;
- gravillons d/D avec $d = 1 \text{ mm}$ et $D = 125 \text{ mm}$.

Pour les terrassements, ces matériaux, comme tous les matériaux non naturels, relèvent dans la norme NF P 11 300 d'un classement F7. Mais leurs conditions d'emploi, toujours en référence à cette norme, sont déterminées par assimilation aux matériaux naturels.

Dans la partie de la norme XP P 18 540 traitant des granulats pour couches de chaussée, des classes spécifiques sont définies pour les matériaux recyclés, fondées sur la teneur en sulfates. Pour les autres caractéristiques, les matériaux recyclés suivent le même classement que les granulats naturels.

1. **Les caractéristiques intrinsèques** de ces matériaux recyclés sont faibles et comprises en général dans les fourchettes suivantes :

- résistance à la fragmentation $\dot{\bar{L}}_A$ compris entre 25 et 50 $\dot{\bar{L}}_A$
- résistance à l'attrition $\dot{\bar{M}}_D$ compris entre 15 et 50 ,
conduisant à des classements E ou D selon la norme XP P 18 540.

Pour des utilisations plus ciblées des graves, un aménagement des classements a été introduit dans le guide technique Ile de ~~France~~-France. C'est la classe E+, pour laquelle les trois conditions suivantes doivent être vérifiées :

- LA = 40
- MDE = 35
- LA + MDE = 65. [8]

Les graves relevant de ce classement ont des domaines d'emploi étendus, par rapport aux matériaux de classe E. En particulier, elles sont utilisées dans des couches de chaussées sous des trafics plus lourds.

3-2. Les caractéristiques de fabrication des matériaux issus de démolition sont variables, essentiellement du fait de leur mode d'élaboration, en particulier du concassage ; et leur classement se fait en référence aux normes NF P 11 300 pour l'utilisation en terrassement, ~~et~~ XP P 18 540 pour l'utilisation en couche de chaussée.

~~Classement~~ Et un classement selon la norme NF P 11 300 $\dot{\bar{L}}_A$ matériaux de pré-criblage et graves non calibrées

Les matériaux de pré-criblage et les graves non calibrées sont utilisés uniquement dans les terrassements. Leurs caractéristiques correspondent aux valeurs suivantes :

- le D_{max} [9] est variable et peut être supérieur à 50mm;
- le passant à 80 μ m est en général inférieur à 12 %, et celui à 2 mm inférieur à 70 % ;
- la propreté, caractérisée par la valeur au bleu VBS est ~~variable~~ variable. Aussi, pour le réemploi ces matériaux, trois classes sont introduites :
 - VBS = 0,1
 - 0,1 < VBS = 0,2
 - VBS > 0,2,

Les caractéristiques de ces matériaux conduisent aux classes D21, D31, B31, C1B31, C2B31, B41, C1B41, C2B42 définies par le Guide pour les Terrassements Routiers et la norme NF P 11 300.

Classement selon la norme XP P 18 540 : sables, graves et gravillons

Les sables, graves et gravillons sont utilisés dans les couches de chaussées. Leurs caractéristiques et leurs classement sont les suivants :

- classe III ou IV pour les gravillons
- classe b ou c pour les sables
- sensibilité au gel G de 5 à 15 % [10]
- friabilité des sables de 15 à 30 %
- absorption d'eau de 4 à 8%

Caractéristiques environnementales

Même si la valorisation des matériaux issus de démolition de béton et de matériaux de chaussée est relativement ancienne, les analyses chimiques et les mesures de relargage disponibles restent peu nombreuses.

En 1989, le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg a conduit une analyse complète sur un matériau issu du concassage de produits de démolition [LRPC Strasbourg, 1989]. En particulier une analyse physico-chimique sur lixiviats a été réalisée.

Elle fait apparaître un pH faiblement alcalin (supérieur à 10), une teneur assez forte en aluminium, et des teneurs en métaux lourds très faibles.

Une étude réalisée par l'INSA pour l'ADEME en 1991-1993 et une étude BRGM - DRIRE Nord-Pas-de-Calais [Richer, 2001] ont concerné différents matériaux issus des déchets des chantiers de BTP. A partir de résultats d'essais de lixiviation, ces études ont mis en évidence

· :

- des fractions solubles faibles, sauf pour les matériaux comportant du plâtre qui libèrent des ions sulfate et calcium ;

- des quantités de métaux rejetées faibles excepté pour les matériaux à base de ciment qui peuvent libérer des quantités importantes d'aluminium.

Plus récemment, trois études ont été réalisées à la demande de l'ADEME par l'INERIS et l'INSAVALOR division POLDEN ~~(Abdelghafour et Méhu, 2001)~~, ~~(Pépin, 2001)~~ et ~~(Domas, 2003)~~ sur des matériaux issus de la démolition de bâtiments et sur des matériaux prélevés dans un centre de tri.

Les essais pratiqués sur ces matériaux sont les suivants : · l'essai de percolation ascendante, tel que prescrit dans la version de mai 2001 du "Guide technique relatif aux installations de stockage de déchets inertes" (annexe 6), (MATE, 2001);

- les essais de lixiviation suivant le projet de norme européenne prEN 12457 partie 2 et 3;

- l'essai paramétrique de dépendance au pH dit "méthode ANC" ;

- l'essai de détermination de la fraction maximale mobilisable (FMM) qui a pour but d'évaluer la fraction soluble maximale d'un déchet à pH fixé (naturel, très acide et très basique).

L'objectif de ces études était essentiellement de conforter ou de faire évoluer les critères d'admission des textes réglementaires à venir sur la gestion des installations de stockage de déchets inertes. Pour cela un large panel de déchets de démolition et de déconstruction (tri avant abattage), avant ou après passage sur un centre de tri/pré-traitement, posant ou non un problème sanitaire et environnemental (peintures au plomb) a été constitué.

~~En analysant ces études~~, les résultats suivants ont été ~~rencontrés recensés pour les essais de lixiviation~~ :

- ~~Le~~ Le pH des éluats était compris entre 7 et ~~12~~ 12 ;

- ~~Le~~ Le relargage en sulfates était très variable. Pour la valorisation dans les techniques routières, le seuil limite supérieur a été fixé à 0,7%(essai selon la norme XP P 18-581).Ce seuil correspond à la classification SSb selon la norme XP P 18-540 ;

- ~~Le~~ Le relargage en carbone organique total (COT) était inférieure à 300 mg/kg ;

- ~~Le~~ Le relargage en chrome était en général inférieure à 0,4 mg/kg mais, sur un échantillon, une valeur de 1, 65 mg/kg a été ~~mesurée~~ mesurée ;

- ~~Le~~ Le relargage en zinc était inférieure à 0,25 mg/kg ;

- ~~Le~~ Le relargage en baryum était inférieure à 140 mg/kg ;

- ~~pour~~ Pour les autres métaux, les concentrations relarguées étaient inférieures ou proches des seuils de détection ;

- ~~Le~~ Le relargage en ions ammonium et en nitrates était très variable, allant du non détectable à des concentrations 5 à 10 fois supérieures au seuil de détection.

Le pH du matériau recyclé dépend notamment de la quantité de pâte de ciment qui le compose et de son taux de carbonatation. En effet, ce matériau est constitué de silicate d'aluminium et de calcium hydratés, qui vont lui conférer un caractère alcalin. En cas de contact avec l'air, la carbonatation de la chaux résiduelle va faire baisser ce pH au cours du temps.

Aspects sanitaires

S'agissant de matériaux issus de produits initialement présents dans les infrastructures routières et de bâtiments, qui ne subissent pas de traitements autres que mécanique (pas de traitement chimique), les seuls risques sanitaires se situent :

- au niveau du stockage, avant et après traitement, puisque les matériaux sont davantage exposés au lessivage par les eaux de pluie.

- au niveau de la fabrication et de la préparation puisque les actions mécaniques de concassage et de criblage engendrent des fines et poussières.

Les Risques liés à l'amiante, dans ce cas se reporter au :
~~Se reporter au~~ menu généralités/ Aspects sanitaires, plus précisément au paragraphe 5 : « cas particulier des risques professionnels ».

Utilisations dans les infrastructures

Pour la construction d'infrastructures routières, les domaines d'emploi des matériaux issus du recyclage des bétons et des matériaux de chaussées sont nombreux : en remblais , en couche de forme, en masque drainant, en remblais de tranchées et en couches d'assises de chaussées (~~figure~~ Figure 2).

Erreur!



Vue de la chaussée-réservoir



Figure 2 : Exemple de réalisation d'une chaussée réservoir.

A la fin des années 70 et au début des années 80, des bétons recyclés ont été utilisés à titre expérimental dans des bétons de chaussées routières et aéroportuaires en région parisienne, à la fois pour des couches de fondation et des couches de surface. Il est apparu que les coefficients d'absorption d'eau élevés (selon la norme XP P 18 – 540) rendent difficile la maîtrise de la consistance du béton à la fabrication; à ces difficultés s'ajoute également la faiblesse du marché des chaussées en béton en France.

C'est essentiellement dans la région Ile-de-France que l'utilisation du béton recyclé en terrassement et dans les couches de chaussées traitées aux liants hydrauliques et non traitées s'est développée dans les années 90. Ce développement dans d'autres régions est freiné par la disponibilité plus grande de granulats naturels, et par le manque de postes de recyclage, mais de plus en plus d'applications sont dénombrées partout en France.

Domaines d'emploi et textes régissant les conditions d'utilisation

Selon leurs caractéristiques, ces matériaux sont utilisés dans les remblais, en couche de forme, en couche de fondation et de base, avec ou sans traitement aux liants hydrauliques. Les différents types de production visent les domaines d'emploi suivants :

- matériaux de pré-criblage et grave non calibrée en remblais et en couche de forme ;
- grave 0/D en couche de chaussée traitée ou non aux liants hydrauliques
- sable 0/D et gravillons d/D en recomposition de grave traitée ou non aux liants hydrauliques.

Leur emploi est résumé dans le tableau ci-dessous.

TYPES D'UTILISATION	PARTICULARITES (par rapport à des matériaux naturels)	Types de matériaux de gravilons non calibrés	de matériaux de gravilons calibrés	Matériaux de gravilons non calibrés
Remblais : classes de sol selon NF P 11 300.	Si teneurs en sulfates solubles (selon XP P 18 581) > 0,7% : - pas de traitement aux LH - pas de contact avec couches traitées ou ouvrages - pas d'utilisation en zone inondable	X		
Couche de forme : classes de sol selon NF P 11 300, soit B31, C1B31, C2B31, ou D31	- Elimination de la fraction > 50 mm - Elimination de la fraction fine si VBS > 0,2	X		
Couche de base/fondation non traitée : selon NF P 98 129 + guide d'application des normes concernant les GNT	Si catégorie E+ (norme P 18 540) - utilisation possible en couche de base et de fondation si trafic < ou = T3- - utilisation possible en couche de fondation si trafic < ou = T3+		X	X
Couche de base/fondation traitée aux LH : cf. guide d'application des normes concernant les GTLH	On obtient généralement une grave traitée de catégorie G2 (pour les dosages en liant usuels). Si catégorie E+ - utilisation possible en couche de base et de fondation si trafic < ou = T2 - utilisation possible en couche de fondation si trafic < ou = T1		X (selon NF P 98 116)	X (selon NF P 98 113)

Spécificités liées à la mise en œuvre (par rapport aux matériaux naturels)

Par rapport à des granulats naturels, les matériaux issus du recyclage de béton et de couches de chaussée présentent trois particularités, dont il convient de tenir compte lors de leur mise en œuvre :

- Un coefficient d'absorption d'eau plus élevé (de l'ordre de 5 à 6 % en moyenne) dû à la présence de pâte de ciment poreuse. Ainsi, pour une utilisation dans des graves traitées aux liants hydrauliques, il conviendra d'humidifier les matériaux recyclés afin de faciliter le compactage et de ne pas nuire à l'efficacité d'un retardateur de prise, parfois nécessaire pour obtenir des délais de maniabilité suffisants.
- Un caractère frottant marqué se traduisant par des difficultés de compactage.
- Une moindre résistance mécanique à la fragmentation et à l'attrition des grains de mortiers de ciment, traduite par des valeurs élevées des coefficients LA (entre 30 et 50 %) et MDE (entre 15 et 50 %). Aussi pour éviter des problèmes de farinage en surface de couche compactée, les cylindres vibrants lourds doivent être exclus.

Sources sur le territoire français

Déchets de chantiers de bâtiment (enquête CEBTP/DEMAIN pour FFB et ADEME. janvier 1999)

La production totale estimée est de 31 Mt (valeur 1999).

Les déchets minéraux (inertes) représentent pratiquement les deux tiers du gisement total et proviennent essentiellement des chantiers de démolition et des chantiers de réhabilitation de bâtiment (gros œuvre, structure des bâtiments), les bétons de démolition en étant le principal constituant.

Les bâtiments de logements sociaux construits dans les années 50 / 60 et 70 sont cependant constitués de 85 % à 95 % de matériaux minéraux à fort potentiel de recyclage en granulats.

Déchets de chantiers de Travaux Publics (enquête ENERPOL pour FNTP et ADEME. Mars 2003)

Les quantités estimées sont de 280 Mt, environ. Les déblais constituent pratiquement 93% du total. Les bétons (de démolition) représentent pour leur part 5 Mt, le potentiel global de recyclage de déchets de minéraux étant estimé à 15 Mt (remblais, sous-couches routières, bétons,...)

Les enrobés routiers représentent quant à eux environ 3%.

Graves/granulats de recyclage

Une estimation réalisée pour la région IDF en 2001, fondée sur les capacités des installations de recyclage, fait apparaître un potentiel de production dans cette région de 3,1 millions de tonnes.

Le SNPGR^[11], quant à lui, estime le tonnage de graves/granulats de recyclage à 9 Mt pour l'année 2002. Ce chiffre est en progression par rapport aux données de 1995 (5 Mt) du fait conjoint des progrès du recyclage et de l'amélioration de la quantification du gisement.

Emplois répertoriés

Les chantiers utilisant les matériaux de démolition recyclés sur des voiries peu circulées sont nombreux et se développent pratiquement partout en France, plus particulièrement dans les régions suivantes : Rhône-Alpes, Auvergne, Alsace, Nord Picardie, Ile de France.

Recherches en cours

L'utilisation des bétons recyclés en terrassement, dans des couches de chaussées traitées aux liants hydrauliques ou non traitées est aujourd'hui maîtrisée. Elle s'appuie sur les textes de prescriptions et spécifications utilisés pour les matériaux naturels, avec quelques précautions de fabrication et de mise en œuvre aujourd'hui connues. Les limites d'emploi en fonction des caractéristiques intrinsèques des granulats, en particulier de dureté, ont été fixées compte tenu de l'expérience acquise avec les divers chantiers expérimentaux. Les recherches en cours visent à compléter ces connaissances afin de juger s'il est possible d'élargir les domaines d'emploi de ces produits.

Par ailleurs, des études sont en cours pour utiliser les sables et gravillons dans des techniques de traitement aux liants hydrocarbonés.

Bibliographie [12\]](#)

Sommaire :

1 Textes

2 Documents techniques

3. Sites Web

1 Textes

[Circulaire MATE/MELT du 15 février 2000 relative à la mise en place d'une planification de la gestion des déchets de chantier du bâtiment et des travaux publics \(BTP\).](#)

[Circulaire MATE/MELT du 18 juin 2001 relative à la gestion des déchets du réseau national.](#)

Décret n°2002-540 du 18/04/2002 relatif à la classification des déchets.

Directive 75/442/CEE du Conseil de l'union Européenne du 15 juillet 1975 relative aux déchets modifiée par la directive du 18 mars 1991 (91/156/CEE).

MATE, Guide relatif aux installations de stockage de déchets inertes, 44 pages, avril 2001.

2 Documents techniques

Abdelghafour M., Méhu J., Evaluation du comportement environnemental de déchets de démolition, rapport final - INSAVALOR division POLDEN à la demande de l'ADEME, février 2001.

Pépin G., « Caractérisation de quatre déchets minéraux à l'aide d'essais ANC, FMM, Percolation et lixiviation », rapport final INERIS à la demande de l'ADEME, octobre 2001.

Domas J. « Caractérisation de trois déchets minéraux à l'aide de l'essai de percolation prEN14405 », rapport final INERIS, financé par l'ADEME, mars 2003.

SNPGR – bilan de l'activité du recyclage en installation de tri (voir avec eux pour les références)

ADEME. Déconstruire les bâtiments – Un nouveau métier au service du développement durable – Connaître pour agir, guides et cahiers techniques, Mars 2003

ADEME , »Guide des déchets de chantier » ,1998.

Baron, J., Sauterey R ., « Le béton hydraulique », Presses de l'ENPC, 1982.

Conseil général des ponts et chaussées, « Gestion des déchets du bâtiment et des Travaux publics », (1997).

Guide technique pour l'utilisation des matériaux régionaux d'Ile-De-France, « Les bétons et produits de démolition recyclés », 1996 . (version actualisée à paraître)

Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Strasbourg, « Etude des matériaux issus du concassage de produits de démolition ... « , 1989.

Monographie Utilisation des matériaux de Haute-Normandie : « Sous produits industriels et matériaux divers », mars 2000.

Note d'information SETRA, N°63, avril 2000.

Note d'information SETRA-LCPC, « Réemploi de béton de démolition dans le domaine routier », octobre 1983.

Québaud M., Courtial M., Buyle-Bodin F., « Les granulats recyclés issus des produits de démolition : relation entre « l'élaboration et les caractéristiques », Laboratoire d'Artois Mécanique et Habitat, Annales du BT et des TP, juin 1997 .

Richer G., « Matériaux de démolition en région Nord-Pas-de-Calais : recommandations de stockage et de recyclage » Etude BRGM - DRIRE Nord-Pas-de-Calais, avril 2001.

SETRA- LCPC (2000 2^{ème} édition) : guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme. Guide Technique D 9233, encore appelé couramment **GTR** dans le réseau du ministère de l'équipement.

3. Sites Web

<http://www.ademe.fr>

<http://www.unicem.fr>

<http://www.ffbatiment.fr>

<http://www.fntp.fr>

Page: 1

[\[1\] Glossaire](#)

Page: 4

[2] Petit décalage mineur.

Page: 4

[\[3\] Glossaire](#)

Page: 5

[\[4\] Glossaire](#)

Page: 5

[\[5\] Glossaire](#)

Page: 5

[\[6\] Glossaire](#)

Page: 5

[\[7\] Glossaire](#)

Page: 7

[\[8\] Glossaire](#)

Page: 7

[\[9\] Glossaire](#)

Page: 7

[\[10\] Glossaire](#)

Page: 12

[\[11\] Glossaire](#)

Page: 13

[\[12\] La bibliographie doit être mise à des normes communes à toutes les fiches.](#)

Annexe 5

Matériaux bitumineux recyclés

Avertissement :

Résumé sur la gestion des agrégats revoir la qualité de l'organigramme.

Détail amiante : je me demande si le site de Jussieu n'est pas un peu trop polémique, problème de neutralité

Centrale type

"La plupart des particules solides proviennent des granulats" Phrase paradoxale à reformuler!

Organisation des études préalables

CCGT mettre au glossaire

Le cas général

Le cas particulier où

Les matériaux bitumineux recyclés

Résumé

La route moderne est née au XVIII^{ème} siècle. Une route subit les assauts du trafic, du temps et des intempéries. Elle ne peut donc pas être conçue, par essence, pour, sans intervention ultérieure, durer indéfiniment. Les travaux d'entretiens inéluctables sont plus ou moins importants, et il est quelquefois nécessaire de détruire la chaussée pour l'entretenir. Les agrégats d'enrobés sont les matériaux issus de la déconstruction des chaussées réalisées en enrobés bitumineux, c'est à dire des mélanges constitués de granulats de différentes tailles (pour environ 94 à 96%) et d'un bitume (pour respectivement et dans l'ordre 6 à 4%). Les agrégats d'enrobés sont intégrés à la récente classification des déchets (décret d'avril 2002) et leur utilisation est précisée dans une circulaire du ministère de l'environnement, datant de 2001.

La réutilisation des agrégats d'enrobés en technique routière est subordonnée au respect des exigences technologiques, environnementales et de santé publique. L'emploi passe donc par une démarche faisant intervenir un arbre-organigramme de décisions comprenant la caractérisation physique, chimique et environnementale, ainsi que la connaissance de la provenance et de la quantité des agrégats à réutiliser. Les techniques de réutilisation sont multiples et complémentaires et concernent la réutilisation dans un cycle de fabrication à chaud (on parlera de recyclage) et la réutilisation à froid (on parlera de retraitement). En matière de possibilités, on distinguera donc le retraitement en place à froid, le retraitement en centrale à froid, le recyclage en place à chaud, le recyclage en centrale à chaud, et l'utilisation en remblais routiers. L'ensemble de ces techniques permet, en conciliant les domaines d'emploi, les caractéristiques générales des agrégats, la proportion de ces agrégats dans le produit fabriqué et l'incidence sur l'environnement, d'offrir des choix qui couvrent toutes les couches de la chaussée, et pour tous les trafics.

Quelle que soit la réutilisation, les agrégats d'enrobés doivent impérativement être conditionnés pour disposer d'une taille adaptée à la technique de recyclage. Ce conditionnement est réalisé soit lors de la déconstruction de la chaussée par fraisage, soit par des opérations ultérieures de concassage criblage. Les granulats de base (diorite, basalte, quartzite...) des enrobés, et donc des agrégats d'enrobés, possèdent des caractéristiques propres de résistance à l'usure, à l'écrasement et au polissage. Le bitume, qui possède un grand pouvoir agglomérant, est utilisé pour lier ces granulats. Ce bitume provient exclusivement du traitement des pétroles bruts et il convient de souligner que le goudron (produit de la distillation de la houille) n'est plus utilisé en France. Malheureusement, ce terme de goudron est encore utilisé à tort par les non initiés pour désigner un revêtement routier.

L'ensemble du réseau routier représente potentiellement un gisement de plusieurs milliards de tonnes d'agrégats d'enrobés. Le tonnage actuel d'agrégats d'enrobés, dus aux politiques

d'entretien, est estimé à environ 5 millions de tonnes, dont la moitié est valorisée par recyclage et retraitement. Sur le plan technique, les précautions d'emploi concernent principalement les études liées à la connaissance des caractéristiques du bitume vieilli qui se trouve dans les agrégats d'enrobés, et aux possibilités de redonner à ce bitume des caractéristiques désirées, ainsi qu'aux caractéristiques des granulats. Car, bien entendu, le produit fabriqué ne se soustrait pas aux règles élémentaires des contrôles de fabrication. En matière d'environnement, l'accent est mis, selon les techniques, sur les rejets polluants à l'atmosphère ou dans les sols. Dans ce domaine, qui est devenu une des préoccupations majeures des sociétés industrialisées, et même si les agrégats d'enrobés sont à considérer, puisque venant de la route, comme des constituants sans problème, la recherche est active et évolue de pair avec la réglementation.

Ces considérations incitent à croire qu'à l'avenir, l'ensemble des agrégats d'enrobés sera valorisé, contribuant ainsi à la préservation des ressources, tout en respectant la nature et l'environnement.

Définition

Les agrégats d'enrobés sont des matériaux granulaires provenant du fraisage ou de la démolition d'enrobés bitumineux ainsi que des surplus de centrales d'enrobage.

Textes spécifiques de références

1 Références normatives

2 Références législatives et réglementaires

1. Références normatives

Normes afférentes aux constituants :

- NF T 65-000 à 66-040. Normes sur les *liants hydrocarbonés*
- XP P 98-135 Norme sur la caractérisation des agrégats d'enrobés pour le *recyclage à chaud* en centrale.
- Projet de norme NF EN 13108-8 « Mélanges bitumineux – Spécifications de matériaux – partie 8 : Agrégats d'enrobés »

Normes afférentes aux matériaux composés

- NF P 98-121, NF P 98-139. Normes sur les enrobés à froid
- NF P 98-130 à 98-151. Normes sur les enrobés à chaud
- NF P 98-149. Enrobés hydrocarbonés - Terminologie.
- NF P 11-300 Exécution des *terrassements* – classification des matériaux utilisables dans la construction des *remblais* [1] et des *couches de forme* [2] d'infrastructures routières.

2. Références législatives et réglementaires

- ~~Arrêté~~ L'arrêté du 30 juin 1997 relatif aux prescriptions applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la *rubrique n° 2517*, ~~Fixe~~ fixe les dispositions à appliquer pour les stations de transit de produits minéraux solides dont la capacité de stockage est comprise entre 15000 et 75000 m³.
- ~~L'a~~ Arrêté du 2 février 1998 relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi s'intéresse aussi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement. Ce Texte a été modifié par les arrêtés du : 3 août 2001, 2 février 2000, 29 mai 2000, 3 mai 2000, 15 février 2000, 14 février 2000, 17 août 1998.

D'autres textes font aussi référence et fixent les règles de gestion des plates-formes de traitement :

- [-La Circulaire du Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'Environnement et du Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement en date du 15 février 2000 : Planification de la gestion des déchets de chantier et des travaux publics \(BTP\).](#)-
- [La Circulaire n° 2001-39 du 18 juin 2001 relative à la gestion des déchets du réseau routier national.](#) Les agrégats d'enrobés sont considérés comme des déchets de la construction routière ([article L.541-1-II du code de l'environnement; ancien article 1 de la loi du 15 juillet 1975](#)). Par ailleurs, ces agrégats ne sont pas, dans la grande majorité des cas, des déchets ultimes ([article L. 541-1-III du code de l'environnement; ancien article 1 de la loi du 13 juillet 1992](#)).

En matière de classification des déchets, le [décret n° 2002-540 du 18 avril 2002](#) reprend la liste communautaire des déchets et en établit, dans son annexe II, une liste unique. L'annexe I de ce décret fixe les propriétés qui rendent les déchets dangereux. Cependant, bien que le droit communautaire ne connaisse que la distinction entre déchets dangereux et non dangereux, la notion de Déchets Industriels Spéciaux (DIS) demeure dans l'actuel code de l'environnement.

Selon cette nouvelle nomenclature française des déchets, les agrégats d'enrobés sont inscrits dans le chapitre 17, « déchets de construction et de démolition y compris déblais provenant de sites contaminés », et sont répertoriés selon les rubriques suivantes (l'astérisque signifie que le mélange est considéré comme un produit dangereux présentant une ou plusieurs des propriétés énumérées à l'annexe I du décret du 18 avril 2002) :

- 17 03 01 * mélanges bitumineux contenant du *goudron*,
- 17 03 02 mélanges bitumineux autres que ceux visés à la rubrique 17 03 01,
- 17 03 03 * goudron et produits goudronnés, qui sont aussi des déchets dangereux.

La valorisation concerne uniquement les agrégats d'enrobés non dangereux, donc les mélanges bitumineux référencés 17.03.02.

Origine, formation et élaboration

Sommaire :

- 1 Origine**
- 2 Élaboration**
- 3 Stockage**
- 4 Conditionnement**

1. Origine

Les agrégats d'enrobés sont des mélanges de granulats, de liant bitumineux et quelquefois d'additifs, voire de déchets. Lorsque la traçabilité des anciens chantiers permet de situer les zones dites « à risques » contenant des composants répertoriés dangereux, il est fortement conseillé de procéder à une déconstruction sélective et à un tri préalable destinés à orienter les agrégats vers les destinations adaptées. Ceci correspond par ailleurs aux orientations rappelées dans la [circulaire interministérielle du 15 février 2000](#).

Les *agrégats* d'enrobés proviennent essentiellement de trois origines :



Figure 1: Stockage de fraisats de provenance unique

Les matériaux de **provenance unique** sont typiquement issus de grands chantiers, susceptibles de fournir plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de tonnes. Ces *fraisats*,

(3)obtenus par un fraisage respectant des consignes de travail définies à l'aide d'une planche de référence, présentent une homogénéité convenable et leur composition d'origine est souvent connue. Ils constituent, selon la norme XF P 98-135, des agrégats d'enrobés de classe (a)_et sont recyclables en l'état (figure 1).

Photo à insérer dès qu'un exemple est répertorié (OK!)

Les **matériaux de provenances diverses stockés de façon individualisée** sont issus de chantiers de moyenne importance, et stockés en fonction de la provenance de l'enrobé. Obtenus essentiellement sous la forme de fraisats, ces agrégats d'enrobés de classe (b) nécessitent généralement un conditionnement destiné à les homogénéiser avant réutilisation. Envisagé dans le contexte de la norme 98-135 dans l'hypothèse d'un tri préalable, ce cas n'est actuellement pas représenté sur le territoire national.



Figure 2 : Stockage d'agrégats de provenances diverses avant conditionnement

Les autres **matériaux de provenances diverses** regroupent les enrobés issus de la déconstruction de chaussées (fraisats et *croûtes*), les fonds de camion et les *surplus de centrale d'enrobage*. Ces agrégats d'enrobés, de classe (c), sont souvent hétérogènes et subissent un *conditionnement* pour réduire leur dimension maximale et les homogénéiser (figure 2).

2. Elaboration

Dans le cas d'une mise en stock de mélanges bitumineux de provenances diverses, l'élaboration d'agrégats d'enrobés conformes à la réutilisation comprend les phases de stockage des mélanges, de reprise des mélanges sur stocks, de conditionnement et de stockage des agrégats prêts à être réutilisés. Il existe donc deux types de stockage, avant et après conditionnement.

3. Stockage

Le stockage (avant et après conditionnement) dont il est question ici est la mise en stock temporaire d'un produit destiné à être réutilisé, et non la mise en décharge.

Deux types de considérations sont à prendre en compte pour le stockage des agrégats :

- Considérations environnementales

- Selon la nouvelle classification des déchets, les agrégats sans goudron sont des déchets non dangereux (classification 17 03 02).

- Selon le guide technique relatif aux installations de stockage de déchets inertes, les agrégats d'enrobés bitumineux, sans goudron, sont considérés comme admissibles dans la catégorie des *déchets inertes*.

- Considérations pratiques

La mise en conformité d'agrégats de provenances diverses comprend trois parties : (1) les stockages successifs des différents enrobés à recycler, (2) la reprise dans le stock ainsi constitué et (3) le conditionnement de ces agrégats repris. Ces trois opérations sont menées dans l'optique de favoriser l'homogénéité des agrégats d'enrobés. A cet effet, un stockage par couches horizontales des différents approvisionnements, suivi d'une reprise par tranches verticales, permet de prélever avant conditionnement une quantité d'agrégats la plus représentative possible du stock total. Après conditionnement par concassage, criblage ou fraisage avant réutilisation immédiate, les agrégats d'enrobés ne doivent pas être stockés sur une hauteur importante (supérieure à 3m), et la durée de stockage doit être limitée (inférieure à une semaine en période d'été), afin d'éviter la prise en bloc du matériau.

4. Conditionnement

Le conditionnement des agrégats est fonction de la réutilisation envisagée, avec des contraintes en matière d'études préalables imposées par la technique de réutilisation.

- Pour le recyclage en centrale à chaud.

Le conditionnement des agrégats d'enrobés est généralement nécessaire pour les agrégats de classe b et impératif pour les agrégats de classe c. Il consiste à réduire la taille maximale des matériaux et à pratiquer une *homogénéisation* des agrégats pour les rendre conformes à la norme XF P 98-135. Ce conditionnement, réalisé par concassage - criblage, conduit à constituer des stocks temporaires d'agrégats dont la *granularité* dépend du type de formulation envisagée (béton bitumineux ou grave bitume).

Selon les disponibilités en matière de surface de stockage individualisé, on trouve des stocks de type 0/6, 0/10, 0/12,5 mm destiné à être utilisé dans une formulation bien spécifique (béton bitumineux) ou un stock général destiné à la fabrication de grave bitume.

Les étapes successives d'un conditionnement sous la forme d'agrégats 0/10mm sont représentées sur les figures 3, 4 et 5. Dans tous les cas, il reste des refus au criblage réalisé, qui sont destinés aux techniques autres que celle du recyclage à chaud en centrale (figure 6).



Figure 3 : Stock d'agrégats avant conditionnement

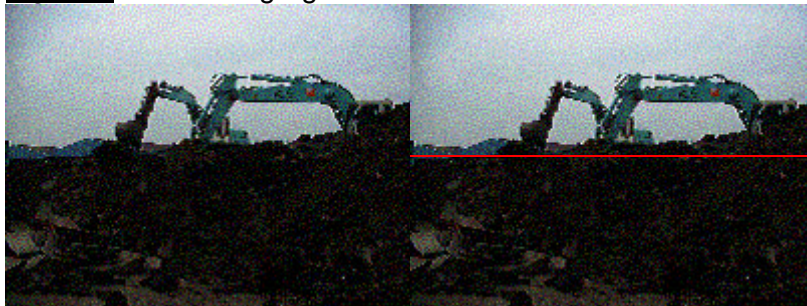


Figure 4 : Reprise par pelle mécanique avant concassage

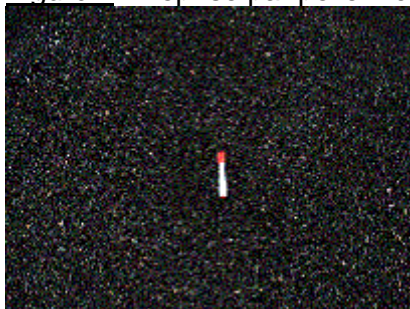


Figure 5 : Stock d'agrégats 0/10mm après concassage – criblage



Figure 6 : Stock de refus au criblage à 12,5 mm

- Pour le retraitement à froid en centrale

Les agrégats de classe b et c font l'objet d'un passage préalable dans une installation de concassage - criblage qui permet d'obtenir la granularité adaptée à l'utilisation ultérieure : 0/20, 0/31,5 mm...

- Pour le retraitement en place à froid ou le recyclage en place à chaud

Lorsqu'il s'agit d'une réutilisation en place, le conditionnement est effectué par fragmentation lors de l'opération de reprise des agrégats d'enrobés. Les documents de référence sont le guide technique de retraitement à froid des anciennes chaussées et le document CFTR à paraître sur le retraitement des chaussées et le recyclage des matériaux bitumineux de chaussée.

- Pour la réutilisation en remblais et couches de forme

La réutilisation en terrassements est subordonnée au classement des agrégats d'enrobés, par la taille maximale de ces agrégats et par la connaissance de leurs caractéristiques géotechniques. Les documents de référence sont la norme NF P 11-300 et le guide technique de réalisation des remblais et couches de forme (GTR)

Complément : [Résumé sur la gestion des agrégats](#)

Caractéristiques physico-chimiques

Sommaire :

1 Problème spécifique lié au goudron

2 Problèmes spécifiques liés à l'amiante

Quel que soit le mode de récupération, fraisage ou récupération par croûtes, la nature minéralogique des agrégats d'enrobés est celle des *granulats naturels* d'origine, provenant de roches massives ou de matériaux alluvionnaires, dont les caractéristiques sont données dans la rubrique granulats routiers classiques. Par ailleurs ces granulats sont enrobés d'un *bitume* fabriqué industriellement par distillation des pétroles bruts. La diversité des molécules présentes dans les bitumes rend impossible la détermination de leur *composition* exacte (Farcas,1998).

1. Problème spécifique lié au goudron

En techniques routières, le goudron utilisé est obtenu par distillation du goudron brut issu de la pyrolyse de la houille. Une analyse pour vérifier l'absence de goudron est nécessaire en cas de doute et en l'absence de connaissances sur les caractéristiques des enrobés d'origine. Pour cela, plusieurs méthodes de détection qualitative du goudron peuvent être mises à contribution (Brazillet et al, 2001). L'analyse peut concerner la mise en évidence de goudron et non sa quantification précise puisque la liste des déchets ne spécifie pas de seuil de concentration pour ce polluant. La production de goudron pour les applications en techniques routières est en constante régression et n'est plus que de quelques dizaines de milliers de tonnes par an.

Complément : [Détails goudron](#)

2. Problèmes spécifiques liés à l'amiante

Dans les enrobés, l'amiante a été utilisée à une certaine époque, sous forme de fibres destinées à fixer une quantité de bitume plus importante conduisant à un film de bitume plus épais et à une amélioration du comportement à la fatigue. Selon le type d'enrobé fabriqué, la teneur pondérale en fibres d'amiante était de 0,5 à 1,4%. Les fibres d'amiante utilisées en technique routière étaient du chrysotile (famille des serpentines) constitué de silicate de magnésium hydraté dont la longueur des fibres varie de 1,5 à 40 µm).

Complément : [Détails amiante](#)

Caractéristiques géotechniques

Sommaire :

1 Caractéristiques de fabrication des agrégats d'enrobés

2 Caractéristiques du liant

3 Classement des agrégats

Les agrégats d'enrobés seront considérés comme des *granulats recyclés* au sens de la norme XP P 18-540. La caractérisation de ces agrégats est réalisée pour le classement et les études de formulation imposés par certaines techniques de recyclage, en conformité avec la fabrication d'un produit normalisé. Pour le recyclage à chaud en centrale, les caractéristiques des agrégats d'enrobés sont spécifiées dans la Fiche Technique Agrégats d'Enrobés (FTAE) [4] définie dans la norme XF P 98 135, et conduisent à des recommandations sur leur réemploi. Cette fiche peut par ailleurs être de type « renseignée », comparable à la définition de la fiche technique renseignée des granulats (FTP) de la norme XP P 18-540. Dans ce cas, les valeurs sont annoncées par le fournisseur des agrégats.

1. Caractéristiques de fabrication des agrégats d'enrobés

Par analogie avec les granulats naturels, les agrégats d'enrobés sont caractérisés après récupération (fraisage) ou après conditionnement (concassage - criblage) comme suit.

Avant désenrobage

Les agrégats d'enrobés récupérés **par fraisage** et destinés à être réutilisés sans conditionnement supplémentaire possèdent les caractéristiques moyennes suivantes :

- Une granularité 0/20 à 0/31mm, la granularité étant principalement dépendante de la vitesse d'avancement de la fraiseuse et de la profondeur de fraisage.
- Une teneur en eau inférieure à 3%, la teneur en eau influant sur le séchage dans le tambour sécheur.
- Un refus à 25mm inférieur à 7% ; la quantité de gros agglomérats (> 25mm) est donc limitée pour favoriser la fragmentation de ces agglomérats dans le tambour sécheur.

Les agrégats d'enrobés récupérés par des moyens **autres que le fraisage** (retours chantiers, pelles, brise roches..) se présentent sous la forme de blocs de quelques kg à une centaine de kg pour des surfaces atteignant le m². Le conditionnement par concassage - criblage permet d'obtenir des granularités conformes à celles souhaitées pour l'utilisation envisagée : 0/6, 0/12,5, 0/20mm...

Après désenrobage

Les caractéristiques moyennes de ces agrégats (obtenus par fraisage ou concassage criblage) **deviennent : sont après désenrobage une**

- granularité 0/10 à 0/14mm **et un pourcentage de**
-% fines variant de 8 à 12

La figure 7 donne une idée de la **courbe granulométrique** moyenne et des valeurs extrêmes obtenues à partir d'analyses d'agrégats d'enrobés de diverses origines et de conditionnement différents (fraisage ou concassage criblage):

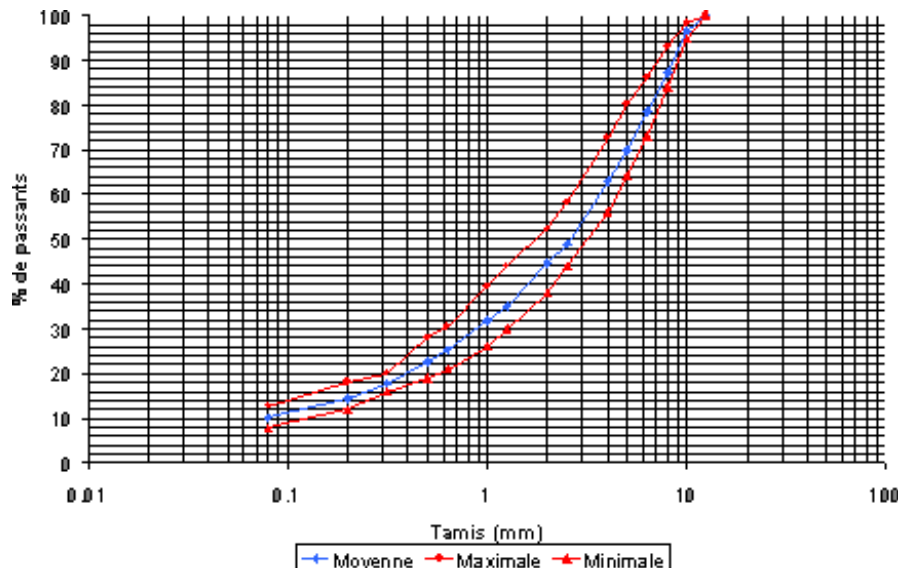


Figure 7: Courbe granulométrique moyenne des agrégats

2 Caractéristiques du liant

La **teneur en liant** des agrégats est fonction du type de récupération. Lorsque les agrégats sont récupérés par fraisage d'une couche d'enrobé homogène, la teneur en liant est proche de celle de l'enrobé d'origine. Lorsque les agrégats sont obtenus après conditionnement d'enrobés de provenances diverses, la teneur en liant moyenne est généralement de l'ordre de 4,5 à 4,7%.

Ce liant, **vieilli**, a subi un premier choc (choc thermique et modifications chimiques) au cours de la fabrication et de la mise en œuvre de l'enrobé d'origine, suivi d'une évolution plus lente dans le temps (oxydation à basse température). L'oxydation des bitumes, qui se produit pendant leur vieillissement à l'enrobage en place comme sur la route, se traduit par un changement dans leur composition générique (Farcas, 1998). Ce « vieillissement » (perte en moyenne d'une classe pour un bitume pur) se traduit par une augmentation de sa consistance (durcissement) et de sa teneur en *asphaltènes*. Les caractéristiques du liant vieilli dépendent ainsi des caractéristiques du liant d'origine, du nombre d'années de service, de la porosité de l'enrobé, de la température, des rayons ultraviolets du soleil, de la nature des granulats (Farcas, 1998) et des sollicitations subies par l'enrobé « récupéré ».

Ces caractéristiques, mesurées après récupération du liant des agrégats, sont représentatives, dans le cas d'agrégats récupérés par fraisage, d'une couche d'enrobés homogènes. En France, les bitumes sont caractérisés par des essais normalisés dont les plus connus sont la *pénétrabilité* et le *point de ramollissement* (méthode bille et anneau) qui permettent d'apprécier leur consistance. Par ailleurs, les modifications de consistance pouvant s'accompagner de variations de la quantité et de la qualité des asphaltènes [6]. Cette teneur en asphaltènes est aussi un élément pris en compte dans la caractérisation du liant ancien, caractéristiques qui influent sur le choix d'un *liant de régénération*.

Le liant ancien peut donc présenter, selon le chantier dont les agrégats sont issus, des caractéristiques très différentes (Tableau 1) :

Pénétrabilité à 25°C (1/10mm)	Température Bille Anneau (°C)	Teneur en asphaltènes (%)
De 8 à 50	De 55 à 80	De 15 à 25

Tableau 1 : ordres de grandeurs des caractéristiques des liants anciens

Pour les agrégats **d'enrobés issus de provenances diverses**, la difficulté de prélever des échantillons représentatifs, couplée à la difficulté matérielle (coût et temps) de multiplier les analyses fait que ces caractéristiques restent imprécises. Dans ce cas, le choix de la technique de valorisation et la limitation de la part d'agrégats à réutiliser (taux de recyclage) compensent ce manque de précision.

3. Classement des agrégats

Terrassement

Dans l'optique d'une réutilisation en remblais et couches de forme, les agrégats appartiennent à la famille F7 définie dans la norme NF P 11-300 (matériaux de démolition). S'ils sont concassés et criblés (ou s'il s'agit de fraisats), ils se rattachent à la classe F71. Dans le cas inverse, ils sont à classer en F73. Comme tous les matériaux de la classe F, la définition de leurs possibilités d'utilisation fait ensuite appel à divers critères géotechniques qui permettent de les assimiler à des sols ou roches. Compte tenu de leur *D*, de leurs *passants* à 80µm et 2mm, et de leurs caractéristiques mécaniques (*L.A.* + *M.D.E.*), les agrégats concassés-criblés ou fraisés sont assimilables la plupart du temps aux classes D21 ou D23.

Chaussées

Pour la réutilisation dans les **enrobés hydrocarbonés à chaud**, la norme XP P 98 135 fixe les catégories d'agrégats en fonction de la granularité (G1, G2, GNS) et des *caractéristiques intrinsèques des granulats* (R1, RNS), ainsi que de la *teneur en liant* (TL1, TL2, TLNS) et des *caractéristiques de ce liant* (B1, B2 et BNS). Le qualificatif NS signifie non spécifié, lorsque la caractérisation pose des problèmes de représentativité, et dans ce cas le domaine d'emploi (cf. 8.3) nécessite la limitation du taux de recyclage.

Pour les **autres utilisations** en tant que granulats pour *chaussées* (*G.N.T.*, *M.T.L.H.*,...) [7], les agrégats sont considérés comme des granulats recyclés au sens de la norme XP P 18 540, et doivent donc être classés selon les critères habituels de cette norme.

Caractéristiques environnementales

La prise en compte des caractéristiques environnementales des agrégats étant récente, le nombre d'analyses chimiques disponibles effectuées sur des agrégats d'enrobés est à ce jour limitée. Citons une étude effectuée aux Etats Unis portant sur l'analyse de lixiviats d'agrégats d'enrobés récupérés selon les procédures de type TCLP [8] (Toxicology Characteristic Leaching Procedure) et SPLP [9] (Synthetic Precipitation Leaching Procedure). Les résultats de cette recherche (Townsend, 1998, 31 Ko) montrent que pour la majorité des cas de réutilisation et par rapport aux polluants recherchés, les agrégats d'enrobés n'induisent pas de risques environnementaux rédhibitoires.

Citons par ailleurs deux expérimentations françaises, l'une réalisée par le laboratoire régional des Ponts et Chaussées de St Briec (Odie, 2002) sur la caractérisation environnementale de deux fraisats d'enrobés, l'autre réalisée par l'INERIS concernant des essais de percolation sur deux déchets bitumineux (Pépin, 1998). Il ressort de ces expérimentations que la récupération d'agrégats sur des sites qui avaient fait l'objet d'un suivi de chantier, et dont les connaissances antérieures permettent de s'assurer de l'absence de goudron, ne pose pas de problème particulier. Ces agrégats (deux échantillons issus pour l'un d'une couche de BBSG [10] et l'autre d'un enduit superficiel ayant été tous les deux couche de roulement d'une route nationale de trafic T1 pendant 10 ans) sont considérés comme des déchets inertes et non dangereux (Odie, 2002). L'autre étude (deux échantillons issus pour l'un d'une route départementale et pour l'autre d'un prélèvement urbain) montre qu'en l'absence de données sur le chantier d'origine (Pépin, 1998), il n'est pas possible d'exclure la présence de goudron dans les agrégats (présence avérée dans le prélèvement de route départementale). (Pépin, 1998).

Par ailleurs, aucun des échantillons n'a mis en évidence la présence notable de métaux lourds, ni de *benzo(a)pyrène*.

En terme de caractéristiques environnementales, l'agrégat d'enrobé sera, en dehors du goudron, potentiellement polluant à cause :

- Des constituants qui entrent dans sa composition initiale (liant, additifs..), et qui, même s'ils ne posent pas de problème lors de la fabrication de l'enrobé d'origine, peuvent constituer une source de pollution à la réutilisation (ainsi dans le cas de la réutilisation à chaud en centrale, les agrégats peuvent être exposés à des températures plus élevées

que celles du liant et des additifs lors de la fabrication de l'enrobé d'origine, favorisant des émissions gazeuses). Dans ce domaine, il faut noter que l'introduction de déchets dans la composition des enrobés bitumineux peut avoir un effet négatif sur l'environnement et qu'il est important de connaître l'existence de ces déchets pour le recyclage ultérieur (fiche de caractérisation FTAE [11]).

- ~~des~~ Des polluants d'origine externe amenés lors de la durée de vie de l'enrobé (par exemple circulation routière, corrosion des rails de sécurité...). Il convient de noter que dans ce cas, le paradoxe actuel fait que la prise en compte du caractère polluant de l'agrégat n'intervient que lorsque celui-ci est retiré de la ~~route~~ route.
- Des constituants spécifiques employés lors de la réutilisation (par exemple liant de régénération très susceptible thermiquement dans le cas de la réutilisation en centrale à chaud et à fort taux de recyclage).

Pollution associée à la composition initiale

Hormis le goudron, traité à part pour son caractère très nocif, les agrégats, provenant des enrobés très minces, minces ou épais, des enrobés drainants, des couches d'accrochage, des enrobés coulés à froid, des couches antifissures, peuvent contenir :

- ~~des~~ Des bitumes routiers, essentiellement fabriqués par distillation directe, et désignés par une fourchette de pénétrabilité à 25°C. Les spécifications auxquelles répondent ces bitumes sont contenues dans les normes NF T 65-000 et NF T 65-001.
- ~~des~~ Des bitumes modifiés par l'adjonction de polymères thermoplastiques sélectionnés.
- Des additifs, tels que matières plastiques recyclées, granulats de caoutchouc, fibres, asphaltes naturels.
- ~~des~~ Des bitumes fluxés, (enrobés stockables, émulsion de bitume, enduit superficiel).
- Des bitumes spéciaux de type multigrade, et des bitumes pigmentables (enrobés de couleur se retrouvant au niveau des agrégats de provenances diverses).
- ~~à~~ A l'avenir tous les déchets incorporés dans les enrobés d'origine.

Selon les techniques de réutilisation, la pollution potentielle concerne l'air, l'eau et les sols.

A l'heure actuelle, peu de résultats de lixiviation des bitumes ont été publiés. Même si elle ne concerne pas directement des bitumes liés au recyclage, citons une étude concernant l'évolution au cours du temps de la concentration des *Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques* dans les eaux de lixiviation ainsi que le comportement à la lixiviation d'autres composés potentiellement polluants et présents dans le bitume.

Cette étude, qui fait le point sur des essais menés sur neuf liants bitumineux de composition différente, plus un enrobé fabriqué avec l'un des bitumes (bitume issu d'un brut du Moyen Orient), montrent que :

- les bitumes et l'enrobé étudiés ont donné des résultats comparables ; ~~que~~
- tous les bitumes testés ont montré la même tendance à la lixiviation au cours du temps ;
- ~~que~~ les concentrations des composés autres que les HAP sont en dessous de la limite de détection ; ~~et~~
- ~~que~~ la concentration en HAP des eaux de lixiviation reste très en dessous des limites de concentration établies pour les eaux de surface par la CEE et très inférieure aux limites existantes pour les eaux potables (Bowen, 2000).

Pollution associée aux polluants fixés en phase de service de la chaussée

Au cours de la vie de la chaussée, les agrégats d'enrobés peuvent stocker une part de la pollution provenant de la circulation routière, tels que métaux lourds avec principalement le plomb, le zinc et les métaux rares introduits par les nouvelles technologies limitant la pollution des véhicules. La pollution potentielle concerne dans ce cas plutôt l'eau et les sols. A partir des résultats des tests de percolation obtenus sur des agrégats (fraisats d'une couche de BBSG [12] ayant été couchée de roulement pendant 10 ans sur une route nationale de trafic T1⁺) une estimation des transferts de polluants a été réalisée dans l'optique d'une « mise en stock » (Odie, 2002). Les calculs effectués montrent que les eaux de percolation issues du stock de fraisats sont proches du niveau dit seuil de potabilité (Odie, 2002). Les fraisats étudiés étaient certes assimilés à des déchets inertes, mais le calcul est réalisé sans

prendre en compte de facteur de dilution, dilution qui intervient dans la problématique réelle du stockage.

Pollution associée à des constituants spécifiques lors de la réutilisation

Le fait de recycler induit très souvent l'utilisation d'un liant d'apport qui est différent de celui qui serait utilisé pour une fabrication sans recyclage, avec une aptitude supérieure aux transferts de polluants dans les 3 milieux concernés, l'air, l'eau et les sols.

Dans la technique du **recyclage à chaud en centrale**, la réutilisation d'agrégats d'enrobés dont le liant est particulièrement vieilli peut nécessiter l'utilisation d'un liant d'ajout ayant un pouvoir fluidifiant et *repeptisant* (dispersion et stabilisation des asphaltènes) sur ce bitume vieilli, pour qu'il retrouve ses propriétés initiales. La conséquence est une susceptibilité thermique plus importante pour ce liant d'ajout, qui peut se traduire par des émissions gazeuses polluantes lors de la fabrication et la mise en œuvre des nouveaux enrobés (Jullien et al, 2002,).

Les agrégats d'enrobés constituent aussi une source de matériaux pouvant être recyclés à froid. La **fabrication des enrobés froids** est réalisée avec une émulsion *régénérante* de bitume, qui est une dispersion de deux produits non miscibles (le bitume et l'eau). L'émulsion n'est qu'un état transitoire destiné à fluidiser le bitume utilisé et à permettre aussi la mise en œuvre de l'enrobé fabriqué. Pour les traitements à froid avec un liant bitumineux, l'émulsion régénérante est aussi déterminée en fonction des propriétés du vieux bitume.

Pollution associée à la fabrication à chaud en centrale

Emission de particules solides

Les émissions de particules solides font depuis longtemps l'objet d'une réglementation. Les émissions des centrales d'enrobage sont passées de plusieurs tonnes à l'heure (en l'absence de dépoussiéreur), à une quantité inférieure à 5kg/h avec la généralisation des dépoussiéreurs à médiateur filtrant. Le seuil actuel est de 100 mg/Nm³ [13] pour les centrales fixes et de 50 mg/Nm³ pour les centrales mobiles.

Aspects sanitaires

L'évaluation du risque est une démarche visant à structurer et analyser les éléments scientifiques disponibles pour guider les décisions en matière de protection sanitaire et environnementale. Cette démarche comprend les étapes suivantes : identification des *dangers*, sélection des valeurs de référence (toxicologiques et écotoxicologiques), estimation de l'exposition et caractérisation du *risque*. Les *impacts* sur l'environnement et la santé des différentes étapes de la technologie des enrobés bitumineux commencent seulement à être étudiés (AIPCR, 1995), (Townsend, 1998). Se pose ainsi la question de la prise en compte des valeurs de référence adéquates et il est aujourd'hui difficile d'estimer les effets marginaux sur l'environnement et la santé d'un remplacement partiel des granulats neufs par des agrégats d'enrobés. Des renseignements concernant le classement des polluants et le risque, selon l'exposition, pour la santé humaine sont donnés sur les sites de l'E.P.A. (Environmental Protection Agency) et du C.I.R.C. A l'intention des chercheurs souhaitant s'intéresser à ce problème, on peut signaler quelques spécificités liés à l'utilisation d'enrobés recyclés, dignes d'une évaluation environnementale particulière :

- Récupération des agrégats

Lors de la récupération des agrégats, par fraisage ou autre démolition, la présence d'amiante dans les enrobés d'origine peut entraîner une mise en suspension dans l'air de fibres. La concentration de fibres d'amiante dans l'air est généralement comptée en fibres par litre d'air. Légalement les concentrations pour les ouvriers travaillant sur des chantiers de désamiantage sont encore comptées en fibres par cm³.

Des différentes analyses réalisées lors de chantiers de récupération d'enrobés avec fibres d'amiante (fraisage ou sciage et enlèvement des plaques au chargeur), il ressort que si la plupart des résultats sont inférieurs au seuil prescrit (0,1 fibre/cm³), certaines mesures se trouvent en valeur limite (valeur moyenne de 0,094 fibre/cm³) et une mesure (à proximité du tambour de fraisage) le dépasse (0,2 fibre/cm³).

- Recyclage à chaud

En cas de recyclage à chaud, les liants anciens contenus dans les agrégats d'enrobés peuvent subir des élévations de température plus importantes que les liants neufs utilisés dans le cycle normal de fabrication d'un enrobé. De plus, les liants de régénération conçus pour les opérations de recyclage d'agrégats en place ou en centrale (à fort taux de recyclage), utilisés pour diminuer la consistance du bitume vieilli (ajout de fractions aromatiques), présentent une susceptibilité thermique plus élevée. Il peut résulter de ces particularités de composition, une modification de la nature des émissions gazeuses, et ce durant les phases de fabrication, de transport et de mise en œuvre.

- Enrobés en place

Une fois en place, ces mêmes particularités de composition chimique peuvent entraîner une modification de la composition des eaux de ruissellement et de percolation à travers les couches de chaussées. Dans une étude récente (Townsend, 1999), les résultats d'essais de lixiviation sur 6 échantillons d'enrobés réalisés avec des agrégats, ont montré que les concentrations en H.A.P., C.O.V, et métaux lourds (Ba, Ca, Cr, Cu, Ni, Zn) étaient inférieures au seuil de détection (entre 0,25 et 5µg/l).

La question peut aussi se poser pour les eaux de rupture d'émulsion, en cas de recyclage à froid.

Emission de particules solides à l'atmosphère

La fabrication des enrobés à chaud impose le séchage et le chauffage des constituants, et donc des agrégats dans le cas du recyclage. A l'intérieur du sécheur, l'échange thermique entre les gaz en écoulement turbulent et les matériaux s'accompagne d'un envol de particules fines, minérales et hydrocarbonées.

Complément : Centrale de type tambour sécheur enrobeur

Des expérimentations réalisées sur une centrale du type tambour sécheur enrobeur, il ressort que la quantité totale de particules solides à traiter par le dépoussiéreur varie globalement de 40 à 700 kg/h, que le pourcentage de passants à 50µm de ces particules est ³ 40%, et que la teneur en liant augmente avec le taux de recyclage (Gallenne et al, 1998).

Complément : Autres centrales

Sur ces autres centrales (tambour sécheur enrobeur à contre courant, centrale de type discontinu), le recyclage n'induit pas, en matière d'envol de particules solides, de différence par rapport aux fabrications classiques.

Sur toutes les centrales les gaz sont dépoussiérés avant le rejet à l'atmosphère, et les particules récupérées sont réintroduites dans la fabrication. Lorsque les dépoussiéreurs sont en bon état de fonctionnement (rendement supérieur à 99.9%), les émissions totales de particules solides à l'atmosphère sont régulièrement inférieures à 50mg/Nm, et le recyclage est théoriquement sans effet sur cette quantité.

Utilisation dans les infrastructures routières

Sommaire :

- 1 Les différentes pratiques existantes
- 2 Domaine d'emploi
- 3 Particularités
- 4 Type de formulation

1. Les différentes pratiques existantes

Les agrégats d'enrobés se caractérisent par ~~une~~ des défauts d'homogénéité conditionnée par la grande diversité de provenances de ces déchets routiers. Leur valorisation optimale doit tenir compte de ce critère d'homogénéité et de la difficulté de pratiquer, en fonction des possibilités techniques et des contraintes économiques, un tri complet et un stockage adapté. Ces exigences conduisent à la prise en compte de plusieurs possibilités en matière de réutilisation. Après vérification de ~~la~~ non-présence/absence d'un déchet classé dangereux (par essai spécifique ou par déclaration avec traçabilité de la composition de l'enrobé d'origine), ces possibilités sont regroupées dans :

- définition du domaine d'emploi en fonction des connaissances antérieures.

L'identification des agrégats fait partie des études préalables, qui sont d'autant plus lourdes que la valorisation sera exigeante en matière de qualité du matériau fabriqué et que le taux de recyclage sera élevé. Des méthodologies d'étude ont été développées pour la caractérisation des agrégats d'enrobés (Huet, Poirier, 1986) et pour le choix du liant d'apport (Bicheron, 1986). Parmi les réutilisations possibles, le recyclage en centrale permet une adaptation de ce taux de recyclage. Pour le recyclage à chaud en centrale, l'adaptation concerne aussi le contenu des études préalables. Ce point particulier mérite d'être détaillé.

Complément : [Organisation des études préalables pour le recyclage à chaud en centrale](#)

3. Particularités

Les précédents chantiers de recyclage ont été réalisés soit avec des agrégats récupérés par fraisage d'une couche unique d'enrobé ancien, soit avec des agrégats conditionnés du type 0/6 mm à 0/20mm par concassage criblage. Le retraitement en place présente la particularité de réemployer les matériaux pour le même usage, dans le même ouvrage, et sans les déplacer.

La récupération par croûtes ou fraisage d'agrégats destinés à être stockés dans un agrégat de provenances diverses ne pose pas de problème particulier, en dehors de l'élimination, à l'avenir, des polluants susceptibles de faire classer dangereux l'agrégat d'enrobé. Il existe toujours, dans ce cas, un conditionnement des agrégats compatible avec la réutilisation envisagée.

La récupération par fraisage d'agrégats destinés à être utilisés dans le recyclage à chaud en centrale à fort taux ou pour des couches de surface de la chaussée mérite une attention particulière. Les règles établies par le passé consiste à surveiller :

- ~~le~~ Le pourcentage de refus à 25 mm des fraisats, qui doit être inférieur à 7% de manière à obtenir un décohesionnement correct lors du passage dans le tambour sécheur.
- ~~la~~ La teneur en eau des fraisats, qui ne doit pas être supérieure à 3% pour éviter les difficultés de séchage.
- ~~la~~ La hauteur de fraisage, pour éviter de tangenter l'interface entre couches et assurer ainsi une meilleure homogénéité.

La récupération sur chaussées a concerné des couches de roulement, des couches de liaison, des ensembles multicouches (dont les couches d'accrochage), pour des formules recouvrant toutes les couches de surfaces (y compris enduits superficiels et enrobés drainants), des bétons bitumineux, des graves bitume. Par la diversité des techniques pouvant être utilisées, les épaisseurs concernées vont de quelques cm à 20 à 30 cm de profondeur.

4. Type de formulation

Le type de formule dépend essentiellement des caractéristiques des agrégats. Pour les enrobés à chauds, les normes produits définissent le cadre de réemploi des agrégats.

Pour le recyclage en centrale, ceux ci sont utilisables dans des graves bitume (GB^[15]), des enrobés à module élevé pour couches d'assises (EME^[16]), des bétons bitumineux semi grenus (BBSG^[17]), des bétons bitumineux à module élevé (BBME^[18]), des bétons bitumineux minces de type c (BBMc^[19]). Le recyclage en place à chaud s'adresse principalement à des formules de type BBSG^[20], mais des expérimentations sont en cours dans le cadre de la charte innovation pour élargir le domaine d'emploi de cette technique à des formules de type Bétons Bitumineux Très Minces (BBTM^[21]) et Bétons Bitumineux Drainants (BBD^[22]) (cas de réutilisation d'agrégats de caractéristiques homogènes). Pour les techniques à froid, les matériaux sont traités soit à l'émulsion de bitume, soit avec un liant hydraulique, soit avec un liant composé, pour des formulations adaptées à la réfection de couches de surfaces ou des renforcements structurels.

Sources sur le territoire français

En dehors des rebus de fabrication (matériaux non conformes et blancs de fabrication), les agrégats d'enrobés sont constitués pour une grande part des « déchets » provenant des activités d'entretien du réseau routier français.

Complément : [Détail sur le réseau routier](#)

L'ensemble du réseau routier (national, départemental et communal), d'environ 980 000 km, représente potentiellement un gisement de plusieurs milliards de tonnes constitué d'un mélange de granulats et de liant, réparti sur l'ensemble du territoire. Le tonnage annuel d'agrégats d'enrobés, d'après l'enquête lancée en 1997 par l'Union des Syndicats de l'Industrie Routière Française (USIRF^[23]), est estimé à environ 5 millions de tonnes (Lemesle **J.P.**, 2000) Il faut noter que la quantité d'agrégats est certainement supérieure du fait des volumes traités par les différents maîtres d'ouvrage. L'ensemble de ces agrégats doit désormais être soit stocké avant valorisation, soit valorisé directement, soit mis en décharge adaptée dans le cas d'agrégats répertoriés comme dangereux.

Actuellement, la répartition concernant la valorisation des agrégats est la suivante (tableau 6) :

Destination	Quantité (t)	% de la quantité disponible
Mise en décharge	1 200 000	28%
Stockage	1 001 130	23%
Valorisation		
Centrale à chaud	352 000	8%
Remblai (en l'état)	1 301 250	30%
Remblai (après concassage)	433 000	10%
In situ (chaud et froid)	54 000	1%

Tableau 6 : Valorisation des agrégats (source USIRF)

La technique du recyclage existe depuis le début des années 1980, et les emplois sont trop nombreux pour être répertoriés. Des documents de synthèse existent, faisant référence à la technique utilisée et au chantier concerné :

- Bilan des chantiers de recyclage à forts taux, Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées, 1992).
- Table ronde ~~le-le~~ réemploi des enrobés, Bulletin des Ponts et chaussées, 1993/
- Dossier recyclage, Revue générale des routes et aérodromes, 1993 .
- Le traitement des chaussées anciennes et le recyclage des enrobés (Sainton, 1994).
- Bilan de la régénération des enrobés (1989), document GSC 33, (Bicheron).

Par ailleurs, des documents traitent de points spécifiques concernant le matériel, la technique ou le suivi d'un paramètre particulier :

- Le retraitement à chaud des matériaux bitumineux en centrale d'enrobage, note d'information SETRA, (Monéron, 1997).
- Recyclage en centrale des enrobés bitumineux, synthèse bibliographique des recherches menées à Blois entre 1978 et 1982 (Seytre, 2002).
- Autoroute A2, Recyclage à très fort taux (Route Actualité, 1996).
- Le retraitement en place à froid des anciennes chaussées, (Lefort, 1997).
- La grave mixte enrobés recyclés-liant routier, (Saubot, 1997).
- Le recyclage en place des chaussées, (Baillie, 2000).
- Le recyclage des enrobés drainants(Brosseaud, 1999).
- L'évolution sur la route de liants régénérés(Harlin, 1987).

Recherches en cours

Les recherches en cours dans le réseau des LPC concernent :

- L'incidence du type de centrale d'enrobage à chaud, du type de combustible, des conditions de fonctionnement de la centrale sur les rejets gazeux à l'atmosphère.
- La quantification d'un critère environnemental permettant de prendre en compte de manière objective la technique du recyclage dans des études comparatives (Jullien, 2003 JULLIEN A 2003).
- La réutilisation d'agrégats d'enrobés dans les techniques utilisant des liants hydrauliques ou mixtes, en matière de comportement mécanique.
- L'adaptation des études de formulation permettant de s'affranchir de la variabilité des caractéristiques des agrégats.
- La possibilité d'utiliser des agrégats d'enrobés dans des fabrications de béton routier.

Bibliographie ^[24]

- FARCAS F. (1998), Etude d'une méthode de simulation du vieillissement des bitumes sur route, Document publié par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- BRAZILLET C., DOMAS J. (2001), Le goudron dans les déchets du réseau routier : étude bibliographique et méthodes de caractérisation rapides, document INERIS.
 - ODIE L. (2002), Caractérisation environnementale de fraisats d'enrobés, Laboratoire régional de Saint Brieuc.
 - PEPIN (1998), Essais de percolation sur deux déchets bitumineux, document INERIS.
 - TOWNSEND T.G. (1998), Leaching characteristics of asphalt road waste, Department of Environmental Engineering Sciences, University of Florida.
 - BRANTLEY A.S., TOWNSEND T.G. (1999), Leaching of pollutants from reclaimed asphalt pavement, Environmental Engineering Science, 16 no.2, 105-116.
 - BOWEN C., De GROOT P., BRANDT A., (2000), Etude de la possibilité de lixiviation des hydrocarbures aromatiques polycycliques présents dans le bitume, , Revue générale des routes et aéroports, n°787, pp. 58 à 61.
 - CIRC Centre International de Recherche contre le Cancer. Overall Evaluations of Carcinogenicity to Humans. Site Internet <http://193.51.164/monoeval/grlist.html>
 - US-EPA Integrated Risk Information System (IRIS). Site internet <http://www.epa.gov/iris/subst/index.html> ^[25]
 - Association Internationale Permanente des Congrès de la Route (AIPCR), (1995), Aspects sanitaires et environnementaux liés à l'utilisation des mélanges bitumineux.
 - Guide technique pour la réalisation des terrassements et couches de forme (GTR), (septembre 1992), Document SETRA-LCPC
 - M. HUET, J.C. POIRIER (1986), Méthodologie d'étude en laboratoire des enrobés bitumineux de recyclage, Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées, n°144, juillet-août, pp. 89-93.
 - BICHERON. G., BRULE B., MIGLIORI F. (1986), Régénération des liants pour enrobés : méthodologie d'étude en laboratoire. Exemple de quelques cas de chantiers, Bulletin de liaison des Ponts et Chaussées, n°143, mai-juin, pp. 103-110.
 - LEMESLE J.P.,(2000), La gestion des déchets, Revue générale des routes et aéroports, n°781, février 2000, pp 24 à 26.
 - BONNOT J. et all, 1992, Le réemploi des matériaux bitumineux, Bulletin de liaison des ponts et chaussées, n° 182, novembre-décembre, pp 57 à 88.
 - Revue générale des routes et aéroports, (novembre 1993), n°712, Dossier recyclage.
 - BICHERON G. et all, (1993), Table ronde : Le réemploi des enrobés, Bulletin de liaison des ponts et chaussées, n°184, mars avril, pp 19 à 25.
 - SAINTON A.,(1994), Le traitement des chaussées anciennes et recyclage des enrobés, Revue générale des routes et aéroports, hors série, pages 39 et 40.
 - BICHERON G., (1989), Régénération des enrobés, Bilan, Laboratoire régional d'Aix en provence

- MONERON P.,(1997), Retraitement à chaud des matériaux bitumineux en centrale, Note d'information SETRA n° 98.
- Autoroute A2, recyclage à très fort taux, Route Actualité, 1996, n°56, juillet-août, pp 65 à 68.
- LEFORT M., (1997), Retraitement en place à froid des anciennes chaussées avec un liant hydraulique, Note d'information SETRA n° 99.
- LEFORT M., (1997), Le point sur le retraitement en place à froid des anciennes chaussées, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, pages 5 à 23.
- SAUBOT, (1997), La grave mixte enrobés recyclés-liant routier, une solution performante de valorisation, Revue générale des routes et aérodromes, n° 757, décembre, pp 116 à 120.
- BALLIE M. et all, (2000), Recyclage en place de chaussées, deux techniques Colas, Revue générale des routes et aérodromes, n°781, février, pp 31 à 34.
- BROSSEAUD Y.,(1999), Entretien des enrobés drainants ; les solutions disponibles et leur comportement au jeune âge, Revue générale des routes et aérodromes, n°770, février 1999, pp. 27 à 29.
- HARLIN J.P., (1987), Recyclage des enrobés : Evolution sur la route de liants régénérés, Revue générale des Routes et Aérodromes,
- Dossier d'information Amiante-Jussieu. Site internet : <http://www.sigu7.jussieu.fr/dosamian.htm>

Page: 2

[\[1\] Glossaire](#)

Page: 2

[\[2\] Glossaire](#)

Page: 4

[\[3\] Glossaire](#)

Page: 7

[\[4\] Glossaire](#)

Page: 8

[\[5\] Glossaire](#)

Page: 8

[\[6\] Glossaire](#)

Page: 9

[\[7\] Glossaire](#)

Page: 9

[\[8\] Glossaire](#)

Page: 9

[\[9\] Glossaire](#)

Page: 9

[\[10\] Glossaire](#)

Page: 10

[\[11\] Glossaire](#)

Page: 10

[\[12\] Glossaire](#)

Page: 11

[\[13\] Normo m³, glossaire et préciser les conditions de calcul!](#)

Page: 13

[\[14\] Glossaire](#)

Page: 14

[\[15\]](#)

Page: 14

[\[16\] Glossaire](#)

Page: 14

[\[17\] Glossaire](#)

Page: 14

[\[18\] Glossaire](#)

Page: 14

[\[19\] Glossaire](#)

Page: 14

[\[20\] Glossaire](#)

Page: 14

[\[21\] Glossaire](#)

Page: 14

[\[22\] Glossaire](#)

Page: 15

[\[23\] Glossaire](#)

Page: 16

[\[24\] Réhomogénéisation de la biblio par rapport à une norme commune à tous les autres dossiers.](#)

Page: 16

[25] Liens à éviter ne sont pas toujours disponibles!

Annexe 6

Cendres volantes

Avertissement

Eviter de mettre des crochets à la place des parenthèses pour la bibliographie citée.

CENDRES VOLANTES

Résumé

Les cendres volantes de charbon sont les résidus les plus fins de la combustion du charbon en centrale thermique. Il s'agit d'un résidu de procédé thermique, recensé dans la liste des déchets de la communauté européenne sous les numéros de code 10 01 02 et 10 01 19 suivant le procédé de combustion. Il est à noter qu'il ne s'agit pas d'un déchet industriel spécial, ni d'un déchet dangereux (Décret n°2002-540 du 18 Avril 2002).

Leur nature minéralogique, chimique et leur finesse dépend notamment du combustible d'origine ~~de~~ houille ou lignite (le lignite n'étant plus consommé en France), du procédé de combustion et des paramètres d'exploitation associés. Les centrales à flamme à charbon pulvérisé (procédé classique qui concerne la majorité du parc) brûlant de la houille ont produit des cendres silico-alumineuses. En France, leur utilisation en génie civil et en particulier dans la route s'est développée depuis les années 1960 jusqu'à aujourd'hui où la consommation (notamment dans les bétons, la route, les liants et ciments, les produits d'injection) est supérieure à la production. Elles ont des propriétés liantes en présence de chaux (pouzzolaniques), si bien qu'elles sont communément utilisées en tant que constituant de ciments, de bétons, de liants hydrauliques, ou associées avec du laitier et de la chaux (ou de la chaux seule) pour former des liants dans des mélanges à usages routiers (graves traitées aux liants hydrauliques) ou non routiers (bétons, coulis auto-compactants).

Du fait de leur masse volumique en place modérée (matériau plus léger que la plupart des sols), par le passé, elles ont également souvent été utilisées ~~par le passé~~ seules, pour la réalisation de remblais sur des sols compressibles. depuis fin 1996, la circulaire n° 96-85 du 11 octobre 1996 du ministère de l'environnement, autorise l'utilisation des cendres volantes (combustion de charbon pulvérisé) si celles-ci entrent dans la composition de produits provoquant ou participant à des prises pérennes des mélanges. Pour d'autres utilisations où elles ne développeront pas de prise, leur utilisation est subordonnée à une étude de la composition des cendres et de leurs lixiviats permettant d'apprécier l'absence d'impact sur l'environnement de tels usages. Des études menées à l'initiative de producteurs sont actuellement en cours pour apporter une réponse scientifique à cette exigence.

Depuis la seconde moitié des années 1990, du fait de l'imposition de restrictions d'émission d'oxydes d'azote et de soufre dans l'atmosphère, un nouveau procédé de combustion (lit fluidisé circulant = LFC) a vu le jour. Les cendres produites dans les installations de LFC ont une finesse plus importante et ~~ont~~ pour certaines, ont des propriétés liantes (hydrauliques), pour les autres pouzzolaniques. Leur utilisation n'est pas classique dans la route, elle se développera certainement dans l'avenir.

Définition

Les cendres volantes de charbon sont les résidus de la combustion d'une matière fossile majoritairement carbonée d'origine végétale (le charbon) dans des centrales thermiques en vue de produire de l'électricité. Elles sont prélevées par divers procédés de filtration avant que les gaz ne soient rejetés dans l'atmosphère. Il s'agit d'un **Résidu de Procédé Thermique** (RPT) qui porte le numéro de code 10 01 02 (lorsqu'il provient d'une centrale thermique à charbon pulvérisé) et 10 01 19 (lorsqu'il provient de centrales à Lit Fluidisé Circulant = LFC) dans la liste des déchets de la communauté européenne (décision de la

commission 2001/118/Ce du 16 janvier 2001 modifiant la décision 2000/532/CE en ce qui concerne la liste des déchets). Il est à noter qu'elles ne sont pas classées déchet industriel spécial, et qu'elles ne sont pas non plus considérées comme un déchet dangereux (Décret n° 2002-540 du 18 avril 2002 du 15 mai 1997 relatif à la classification des déchets du ministère de l'environnement).

Textes spécifiques de référence

Sommaire :

1. Les Normes
2. Les circulaires

1. Les Normes :

· **Pour les usages Béton et ciments, Trois normes précisent les exigences auxquelles les cendres doivent satisfaire :**

- la norme européenne EN 450 octobre 1995 (classement P 18 050) et son annexe nationale NF EN 450 octobre 1995 : « Cendres volantes pour béton – Définitions, exigences et contrôle de qualité » ;
- la norme NF EN 197-1 de février 2001 comporte un volet sur compositions de ciments incluant des cendres volantes : « Ciments– Composition, spécifications et critères de conformité » ;
- la norme NF EN 206-1 : « ~~béton~~Béton – partie 1 : spécification, performances, production et conformité » et son annexe nationale de Février 2002.

· **Pour les usages spécifiquement routiers, huit normes sont à considérer**

Les cendres volantes silico-alumineuses doivent répondre aux spécifications définies dans la norme **NF P 98-110 novembre 1991** : « Assises de chaussées – Cendres volantes silico-alumineuses – Spécifications ». Il y est notamment demandé des performances minimales en tant que liant pouzzolanique, l'essai étant décrit dans la norme **NF P 98-111 mars 1992** : « Essai de réactivité des cendres volantes silico-alumineuses à la chaux ».

Les cendres volantes hydrauliques doivent répondre aux spécifications définies dans la norme **NF P 98-112 mars 1992** : « Assises de chaussées – Cendres volantes hydrauliques – Définitions, spécifications ».

Les cendres volantes peuvent également être des constituants secondaires ou majoritaires de liants hydrauliques routiers ou des bétons hydrauliques. La norme **NF P 15-108 décembre 2000** des liants hydrauliques routiers définit des spécifications minimales : « Liants hydrauliques routiers – Composition, spécifications et critères de conformité ».

Dans le cadre de la construction d'assises de chaussées, les matériaux traités aux liants hydrauliques et pouzzolaniques sont normalisés :

- la norme **NF P 98-113 mars 1999** traite des sables traités aux liants hydrauliques, ÷ « Assises de chaussées – Sables traités aux liants hydrauliques – Définition, composition, classification » ;
- la norme **NF P 98-116 février 2000** traite des graves traitées aux liants hydrauliques, ÷ « Assises de chaussées – Graves traitées aux liants hydrauliques – Définition, composition, classification » ; La norme **NF P 98-124 mars 1992** traite des cendres volantes traitées à la chaux et au gypse : « Assises de chaussées – Cendres volantes - chaux - gypse – Définition, composition, classification ».

Deux normes pour des usages spécifiquement routiers sont également en projet :

- la norme pr EN 14227.4, ÷: « Mélanges liés à base de cendres volantes » ;
- la norme pr EN 14227.4, ÷: « Cendres volantes pour mélanges liés routiers ».

Dans le cadre de la norme **NF P 11-300**, les cendres volantes silico-alumineuses classiques sont classées en F2 pour un emploi en terrassement.

2. Les circulaires

Aujourd'hui, les limites d'usage des cendres volantes qui sont produites dans des installations classées pour la protection de l'environnement (au titre de la loi du 19 juillet

1976) sont données par la [circulaire n° 96-85 du 11 octobre 1996](#) du ministère de l'environnement. Cette dernière est relative aux « cendres volantes issues de la filtration des gaz de combustion d'origine fossile dans des installations classées pour la protection de l'environnement » mais ne s'applique pas aux résidus de combustion de Lit Fluidisé Circulant.

Il y est considéré que l'utilisation des cendres volantes de charbon n'est autorisée que si celles-ci entrent dans la composition de produits provoquant ou participant à des prises pérennes des mélanges dans lesquels elles sont introduites. Pour toute autre utilisation (remblai routier, plate-forme) où les cendres ne développeront pas de prise **hydraulique** ou **pouzzolanique**, leur utilisation est subordonnée à une étude permettant d'apprécier l'absence d'impact sur l'environnement de tels usages, cette étude étant basée sur la composition des cendres et de leurs lixiviats.

Origine, formation et élaboration

Sommaire :

1. Nature des combustibles
2. Typologie des centrales
3. Stockage

La combustion dans des centrales thermiques d'un combustible fossile en vue de produire de l'électricité conduit à deux types de sous-produits : les cendres de foyer et les cendres volantes. Il existe plusieurs natures et qualités de combustible, plusieurs procédés de combustion, ainsi que plusieurs modes de gestion des stocks, ce qui conduit à des natures de produit différentes.

1. Nature des combustibles

Les deux combustibles utilisés en France sont le lignite (ou charbon de Provence dont la combustion est aujourd'hui abandonnée) et la houille, deux roches sédimentaires essentiellement issues de débris végétaux ayant subi une transformation en milieu réducteur : un enrichissement en carbone, une déshydratation et un appauvrissement en composés volatiles. **Le lignite** (à débris ligneux) contient 70 à 75% de carbone. **La houille** (également appelé charbon) contient environ 85 % de carbone. Pour mémoire, rappelons qu'il existe une troisième catégorie de charbon : l'antracite qui provient d'une transformation thermique de la houille lors des processus géologiques (ce combustible n'est plus utilisé en France).

2. Typologie des centrales

Les centrales les plus répandues actuellement sont les centrales thermiques **classiques** (également appelées centrales thermiques à **flamme**). On trouve également des centrales à **Lit Fluidisé Circulant (LFC)**.

Dans les centrales thermiques **classiques**, le combustible est transformé en fines particules dans des broyeurs ; il est mélangé à de l'air chaud et injecté sous pression dans la chambre de combustion par des brûleurs. La température de combustion est comprise entre 1200 °C et 1400 °C. Les fumées de combustion passent par des dépoussiéreurs électrostatiques qui retiennent la quasi-totalité des cendres volantes. Pour diminuer l'émission dans l'atmosphère de gaz polluants (dioxyde de soufre et oxydes d'azote), on peut ajouter des installations de dénitrification et de désulfuration. Ces procédés agissent soit au niveau de la combustion (**désulfuration primaire** obtenue par ajout de calcaire, de chaux vive ou de chaux hydratée dans le foyer), soit par un traitement des fumées (**désulfuration secondaire**). En France, la désulfuration primaire, qui avait été expérimentée au milieu des années 1990 (notamment à la centrale de Loire-sur-Rhône), a été abandonnée car elle ne permettait pas de diminuer la production des oxydes d'azote. Aujourd'hui, en France, seule la désulfuration secondaire existe, ce qui ne change pas la nature physico-chimique des cendres.

Les centrales à **Lit Fluidisé Circulant** atmosphérique permettent de diminuer les émissions des oxydes d'azote et de soufre : il s'agit d'un procédé de production appelé Lit Fluidisé Circulant. Dans ces centrales, le combustible, mélangé à du calcaire, est fluidisé à une vitesse comprise entre 5 et 6 m/s, et brûlé à une température de 850 °C, à la pression atmosphérique. Les fumées passent ensuite dans des dépoussiéreurs qui extraient les cendres volantes. Les cendres de foyer sont communément appelées cendres de lit. Ces cendres, qui peuvent contenir des quantités de chaux libre importantes, sont parfois soumises à un procédé d'extinction (transformation par mouillage de la chaux vive en chaux éteinte).

La nature de la typologie des cendres volantes de charbon dépendent **de** :

- **le du** type de chaudière utilisé (charbon pulvérisé ou LFC) ;
- du combustible utilisé ;
- de leur état d'hydratation.

La norme NF EN 197-1 distingue deux classes suivant la chimie de la cendre :

	Siliceuse	Calcique
Teneur en CaO	< 10,0 %	≥ 10,0 %
Teneur en CaO libre	< 1% (voire 2,5% si expansion £ 10 mm/ suivant norme EN 451-1)	
	Leur teneur totale en silice, alumine et oxydes de fer est supérieure à 70 % Elles peuvent être classiques ou de LFC Certaines d'entre elles sont communément appelées silico-alumineuses (NF P 98-111)	Elle sont de LFC Certaines d'entre elles sont communément appelées silico-calciques

Tableau 1 : Nature des cendres en fonction de leur nature chimique

Les cendres sulfo-calciques classiques généralement appelées hydrauliques (plus particulièrement la cendre volante de Gardanne et d'Arjuzanx), connues pour leur pouvoir hydraulique, ne sont aujourd'hui plus produites.

3. Stockage

Les cendres peuvent être stockées suivant trois modes :

Cendres sèches

Une fois captées à la base des cheminées et totalement exemptes d'eau, elles requièrent un mode de transport spécifique aux pulvérulents secs et sont stockées à l'abri des eaux météoriques (silos, transport en camion citerne).

Cendres humidifiées

Une fois humidifiées, leur transport par camion-benne ou wagon est possible. Elles peuvent être stockées à l'air libre et atteindront une teneur en eau d'équilibre qui dépend de plusieurs facteurs dont la finesse du matériau.

Cendres liquéfiées

Elles sont amenées par voie hydraulique dans des bassins de décantation. Certaines de ces cendres se drainent peu et peuvent présenter après décantation des teneurs en eau supérieures à 50 %.

Pour les cendres qui ont un pouvoir **hydraulique** (cendres calciques), les deux derniers modes de stockage ne sont pas adaptées. Pour les cendres siliceuses (ou silico-alumineuses), il existe des installations spécifiques de séchage, qui permettent de fournir des cendres sèches à la demande, à partir de stocks existants et de s'affranchir ainsi des variations saisonnières de production de cendres fraîches.

Caractéristiques physico-chimiques

Sommaire :

1. Les cendres volantes siliceuses (ou silico-alumineuses) classiques
2. Les cendres volantes de LFC

1. Les cendres volantes siliceuses (ou silico-alumineuses) classiques

- Caractéristiques morphologiques

Elles se présentent sous la forme d'une poudre. Les particules sont sphériques, pleines ou creuses (Figure 1).

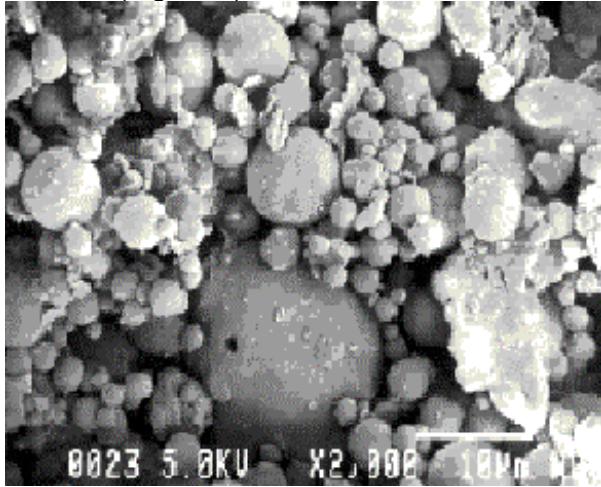


Figure 1 : ~~vue~~-Vue d'une cendre silico-alumineuse classique par microscope électronique à balayage

- Caractéristiques minéralogiques

Initialement, les stériles de houille sont essentiellement constituées de silice et d'alumine sous forme de matériaux phylliteux de composition analogue à celles des argiles, et comportant également du quartz.

La finesse du broyage ainsi que les températures atteintes (environ 1400 °C) conduisent à une modification de la structure minéralogique. On trouve la silice libre sous diverses formes cristallisées : quartz, trydimite et cristobalite. On trouve également des traces de magnétite et d'hématite. Il existe également une phase vitreuse renfermant une partie cristallisée, essentiellement sous forme de mullite (silicate d'alumine de haute température).

- Caractéristiques chimiques

Les éléments les plus représentés sont la silice (SiO_2), l'alumine (Al_2O_3) et les oxydes de fer (Fe_2O_3 et Fe_3O_4) et représentent généralement plus de 70 % de la masse. Elles contiennent également de la chaux (CaO). Le pH d'une solution riche en cendres silico-alumineuses est nettement basique et peut être supérieur à 10- et la

Teneur en chaux totale < 10%. La grande majorité des cendres voient teneurs massiques en % comprises dans les bornes données dans le tableau-Tableau 2 :

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	CaO libre	Alcalins disponibles
40 à 60	25 à 35	7 à 10	1 à 5	» 2	» 5	< 1	< 1	» 0,15	» 0,30

Tableau 2 : Domaine de variation de la composition des CV silico-alumineuses classiques (en pourcentages de masse d'oxyde).

Dans le cas d'une utilisation en assise de chaussée (NF P 98-110), les exigences suivantes doivent être respectées :

- pour être conformes, la perte au feu à 1000 °C doit être inférieure ou égale à 8 %. Dans le cas où la perte au feu dépasse cette limite, la teneur en carbone de la cendre (suivant NF EN 10036) ne doit pas excéder 8 % ;

- de même, la teneur en soufre total exprimée en anhydride sulfurique (SO_3) ne doit pas dépasser 2,5% (selon NF EN 196, partie 2).

Pour une utilisation dans les bétons, les cendres doivent être conformes à la norme NF EN 450. Plus particulièrement, la perte au feu, la teneur en chlorures, la teneur en anhydride sulfurique (SO_3) et en oxyde de calcium libre sont limitées.

- Propriétés liantes

La nature minéralogique et chimique des cendres leur confère un pouvoir pouzzolanique 11 (Figure 2).

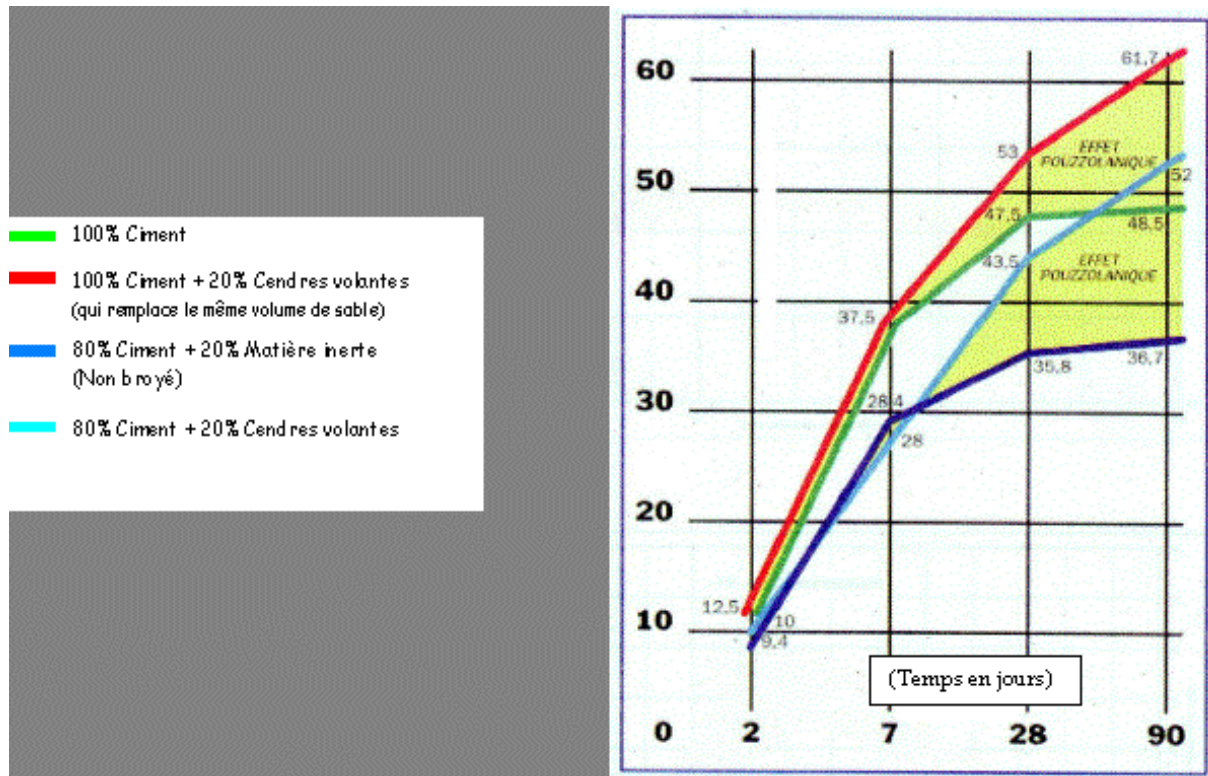


Figure 2 : Illustration du pouvoir pouzzolanique (d'après le PREDIS Nord-Pas-de-Calais : Guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et des co-produits industriels)

2. Les cendres volantes de LFC

· Caractéristiques morphologiques

Elles se présentent sous la forme d'une poudre. Les particules se présentent sous la forme de plaquettes et de fragments alvéolaires.

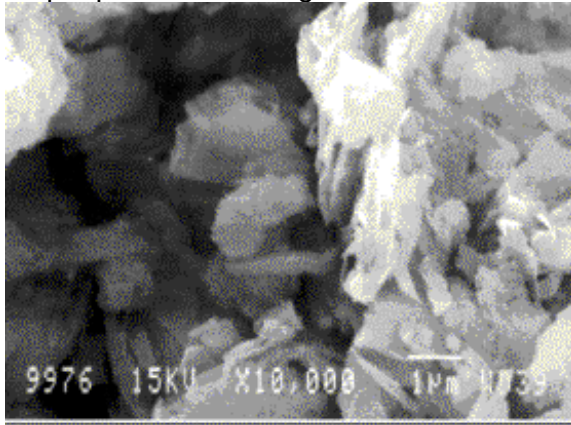


Figure 3 : vue-Vue d'une cendre de LFC par microscope électronique à balayage

· Les cendres volantes siliceuses (ou silico-alumineuses) de LFC

Caractéristiques minéralogiques

On retrouve des phases minéralogiques des cendres silico-alumineuses classiques (quartz et anhydrite en phase majeure, hématite et magnétite en phase mineure) mais également des illites, du mica, du périclase (MgO), ainsi que de la chaux vive et des traces de calcite. La fraction mullitique et la fraction vitreuse sont en quantités moins importantes, **remplacées subordonnées par-à** la fraction sulfatocalcique issue de la désulfuration (elle même dépendant du type de combustible et de la quantité de calcaire introduit dans la chaudière)

Caractéristiques chimiques

La composition d'une Cendre Volante silico-alumineuse de LFC se caractérise par une teneur en chaux inférieure à 10 %. Il est à noter que sa composition chimique (et particulièrement sa faible teneur en chaux) ne permet pas non plus de la considérer comme une cendre volante hydraulique au sens de la norme NF P 98-112.

Propriétés liantes

La nature minéralogique et chimique des cendres leur confère un pouvoir plutôt **pozzolanique**. Une teneur en chaux libre plus importante pourrait leur donner un caractère plutôt **hydraulique**.

Les Cendres volantes calciques de LFC

Caractéristiques minéralogiques

L'anhydrite et la chaux vive sont plus représentés que dans le cas des cendres siliceuses de LFC. On trouve également du quartz en proportion non négligeable.

Caractéristiques chimiques

La variation de composition d'une cendre volante calcique de LFC est donnée dans la tableau 4.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	CaO Libre	MgO	alcalins	SO ₃
15 à 50	5 à 25	5 à 10	10 à 50	1 à 30	< 5	< 5	5 à 25

Tableau 4 : Composition des cendres volantes calciques de LFC en poids pour cent d'oxyde (D'après [3])[\[2\]](#)

Propriétés liantes

Du fait de leur minéralogie, de leur chimie et de leur teneur en chaux libre importante, ces cendres présentent un **caractère plutôt hydraulique**.

Caractéristiques géotechniques

Sommaire :

1. Granularité
2. Classification géotechnique

1. Granularité

Le matériau se présente sous la forme d'une poudre dont la granulométrie est comprise entre 0,5 et 315 µm. La finesse Blaine (surface spécifique) est élevée puisqu'elle est en général supérieure à 200 m²/kg (ce qui n'est pas éloigné des ciments classiques) et même supérieure à 1000 m²/kg dans le cas de certaines cendres de LFC.

Dans le cas des cendres silico-alumineuses, il est à noter que, pour pouvoir être utilisées en technique routière, les passants à 40 µm et 80 µm (cf. XP P 18-540 et X 11-640) doivent être respectivement supérieurs à 40 % et 70 % (cf. NF P98-116).

2. Classification géotechnique

Dans la gamme des sous-produits industriels, la norme NF P 11-300 classe les cendres en catégorie **F2**. Du point de vue géotechnique, il est d'usage de les assimiler à la classe **A1**, compte tenu de leur comportement (sans ajout d'activant ni de chaux), en tant que matériau de remblai.

Caractéristiques environnementales

Il n'existe pas à ce jour de texte réglementant la valorisation de déchets en infrastructures routières sur la base de seuils maximums fonction de l'impact environnemental qu'ils sont susceptibles de générer.

La circulaire 96-85 du 11 Octobre 1996 du la circulaire n° 96-85 du 11 octobre 1996 du ministère de l'environnement autorise sans ambiguïté l'emploi des cendres volantes de charbon classiques si celles-ci entrent dans la composition de produits provoquant ou participant à des prises pérennes des mélanges dans lesquels elles sont introduites.

On ne dispose pas cependant encore d'un panorama complet des caractéristiques environnementales des cendres volantes de charbon. Les quelques résultats disponibles sont assez disparates sur ce point. Il est probable que les caractéristiques d'origine (provenance du charbon) et minéralogiques influencent les relargages à long terme, ainsi que le procédé de fabrication.

Des travaux (Lecuyer et al. 1996) ont été effectués pour comparer les lixiviats issus des trois process différents :

- cendre S-A : une cendre volante silico-alumineuse classique produite à la centrale de Loire-sur-Rhône (charbon d'origine américaine à une masse de cendres volantes égale à 13 % de celle du charbon et 0,97 % de soufre) ;
- cendre C : une cendre volante calcique de désulfuration primaire produite à la centrale de Loire-sur-Rhône (même origine du charbon) dont l'agent de désulfuration est de la chaux hydratée ;
- cendre S-A LFC : une cendre volante silico-alumineuse de LFC de la Centrale Emile Huchet à Carling (type de combustible : résidus de charbon ou schlamms, et charbon humide).

Des essais de lixiviation ont alors été menés sur les trois cendres (suivant la norme X 31-210), présentés dans le tableau 5.

	Cendre S-A	Cendre C	Cendre S-A LFC
pH	11,5	12,6	11,4
Conductivité (mS.cm ⁻¹)	0,9	8,8	3,4
Sulfates (mg.l ⁻¹)	197	1434-1824	658-1440 *
Chlorures (mg.l ⁻¹)	4,5	44-55	34-86 *
Fluorures (mg.l ⁻¹)	1	1,9-2,1	0,4-2 *
Ca ²⁺ (mg.l ⁻¹)	164	1560-1610	425-820 *
As (mg.l ⁻¹)	60-80	<4,5	12-27
Cd (mg.l ⁻¹)	< 0,05	< 0,05	<0,05
Cr (mg.l ⁻¹)	190	226-267	23-410
Cr VI (mg.l ⁻¹)	81-151	23-236	18-276
Cu (mg.l ⁻¹)	<1	<1	<1
Ni (mg.l ⁻¹)	<2,5	<2,5	<2,5
Pb (mg.l ⁻¹)	<1	1,5-2,4	<1
Se (mg.l ⁻¹)	421-511	21-34	20-136
Zn (mg.l ⁻¹)	<5	<5	<5

Tableau 5 : analyse des lixiviats suivant X31-210 après 24 heures (Lecuyer et al., 1996)* : obtenus après 16 heures seulement

On remarque que les cendres volantes issues des procédés destinés à réduire les émissions d'oxydes de soufre ont des lixiviats très riches en sulfates solubles. Le pH du lixiviat est important car il impose des conditions de solubilité différentes pour chaque élément. Dans ces conditions, ce sont surtout le chrome, l'arsenic et le sélénium qui sont solubilisés. La différence observée au niveau de l'arsenic entre les cendres silico-alumineuses classiques et les cendres silico-alumineuses de désulfuration primaire a pu être expliquée par la présence de chaux, beaucoup plus importante dans le deuxième cas. L'essai de lixiviation réalisé avec un mélange de cendres silico-alumineuses et de chaux vive a produit un lixiviat dont les teneurs en arsenic étaient aux limites de la détection, et les teneurs en sélénium très diminuées.

Des travaux finlandais (V. Väänänen et al. 2000) relatent des essais environnementaux de relargage d'enrobés contenant des cendres volantes utilisées comme filler (Tableau 6). Ces essais de diffusion ont été effectués suivant l'essai de diffusion néerlandais pour déchets et matériaux monolithiques N EN 7345. Ces tests laissent apparaître des valeurs de relargage (exprimé en mg d'éléments par unité de surface de monolithe exposé) inférieures aux seuils

d'admission des sites de stockage finlandais (sans isolation et en conditions humides continues).

	Résultats de diffusion d'un enrobé contenant des cendres volantes	Valeurs seuils des sites de stockage de classe 1A dans des conditions continuellement humides et sans isolation
As (mg/m ²) à 64 jours	< 3,6	41
Cd (mg/m ²) à 64 jours	< 0,7	1,1
Cr (mg/m ²) à 64 jours	< 1,7	140
Pb (mg/m ²) à 64 jours	< 3,3	120
Ni (mg/m ²) à 64 jours	< 3,3	50
V (mg/m ²) à 64 jours	< 2,0	230
Mo (mg/m ²) à 64 jours	< 1,9	14
Hg (mg/m ²) à 64 jours	< 0,6	0,4

Tableau 6 : résultats de diffusion [Väänänen *et al.*, 2000] d'un enrobé contenant des cendres volantes.

Une étude complète de l'impact environnemental des cendres volantes et de mélanges contenant des cendres volantes est également en cours dans le cadre de la démarche RPT. [3] Cette étude, réalisée pour le compte de SNET et EDF, est pilotée par INSAVALOR-POLDEN. Elle a notamment fait l'objet d'une thèse financée par l'ADEME soutenue en Novembre 2003. - une communication est prévue lors du congrès WASCON 2003 [4].

Un remblai réalisé en cendres volantes, dans l'Etat du Maryland a été instrumenté au moyen de lysimètres [M.W. Erbe *et al.* 1999]. Cette étude a permis de mettre en évidence la présence de calcium, magnésium, chlorures, sulfates mais également arsenic et manganèse en proportions importantes dans l'eau présente dans le remblai en cendres volantes. Elle a également permis de montrer que des réactions de précipitation et d'adsorption dans le milieu naturel rendent ces concentrations plus faibles dans l'eau présente dans les sols sous-jacents (pour le calcium, le sodium, le chlore, les sulfates et l'arsenic). Plus globalement, l'étude conclue à un impact infime sur l'eau de la nappe sous-jacente.

Aspects sanitaires

Vecteur : transport de poussières par l'air

Les cendres volantes de charbon sont d'une grande finesse et contiennent de la silice cristalline, que l'on peut trouver sous la forme de quartz, mais également de cristoballite ou tridymite. Ces particules de silice cristalline peuvent être à l'origine de pathologies respiratoires. De ce fait, le décret 97-331 du 10 avril 1997 (Décret relatif à la protection de certains travailleurs exposés à l'inhalation de poussières siliceuses sur leurs lieux de travail) impose des seuils de poussières alvéolaires cristallines inhalée sur 8 heures, dans tous les établissements relevant de l'article L.231-1 du Code du travail (c'est à dire les établissements industriels, commerciaux et agricoles et leurs dépendances, de quelque nature que ce soit, publics ou privés, laïques ou religieux) :

- 0,1 mg/m³ pour le quartz ;
- 0,05 mg/m³ pour la cristobalite et la trydimite.

Les cendres volantes étant utilisées en travaux routiers sont humidifiées et utilisées en milieu généralement non confiné ce qui diminue très fortement les risques d'inhalation. La phase de silice cristalline n'est pas présente sous forme majoritaire, la majorité de la silice étant sous forme de silicates et de mullite.

De plus, selon R. Meij *et H. Winkel* [5], les études épidémiologiques montrent que le quartz présent dans les cendres volantes (issues de combustion de charbon pulvérisé), n'a pas le même effet sur l'homme que le quartz pur. Cependant, une exposition a des niveaux

élevés de concentration de cendres dans l'air peut conduire à des bronchites chroniques [(R- Meij et H-te Winkel, Jannée?), bronchites dont le quartz ne semble pas être la raison.

Vecteur eau :

Les autres risques sanitaires (ou environnementaux) éventuels sont liées à des éléments chimiques présents sous forme de traces dans les cendres. En effet, les cendres contiennent du chrome, présent sous forme trivalent et hexavalent, la forme hexavalente étant la plus dangereuse. Néanmoins, les concentrations semblent faibles. R- Meij et H-te Winkel (xxx) relatent des teneurs moyennes de 13 mg/kg, dont seulement un faible pourcentage est susceptible d'être lixivé. Ils relatent également que ce chrome VI une fois lixivé (et transporté dans un sol conduit à des composés insolubles contenant du chrome III, en réagissant avec des composés ferreux.

Radiativité-Radioactivité :

Le problème de la radioactivité peut également être posé. En effet, le charbon est un matériau naturel, et comme tout matériau naturel, il est susceptible de contenir des éléments radioactifs. Dans la mesure où la cendre est un résidu du charbon, elle contient la majeure partie des éléments radioactifs du charbon d'origine. L'US Geological Survey Fact Sheet FS-163-97 relate des teneurs en radionucléides inférieures à celles de sols naturels trouvés communément à la surface.

Polluants organiques persistants :

La combustion de charbon peut également conduire à la production de dioxines. R- Meij et H-te Winkel (xx) donnent des valeurs de 1 picogramme I -TEQ (équivalent toxique internationnalinternational) par gramme (cendres issues de la combustion de charbon pulvérisé de production néerlandaise). Selon les mêmes auteurs, que ce soit pour des gens travaillant avec des cendres ou des riverains, la consommation d'aliments (et notamment les graisses animales) sera encore la source la plus importante de dioxines.

Pour ce qui est des composés hydrocarbonés aromatiques polycycliques (HAP), il semble que les cendres n'en contiennent pas, ou que les valeurs soient inférieures au seuil de détection de 0,07 mg/kg [(R- Meij et H-te Winkel, XXX?).

Recommandations :

En tout état de cause, ces produits peuvent être irritants en cas d'inhalation et de contact avec les yeux. Pour ceux qui ont à manipuler ces matériaux, il faut donc éviter :

- le contact avec les yeux (il faut utiliser des lunettes de sécurité) ;
- l'inhalation (il faut utiliser des masques contre la poussière en particulier dans les lieux peu ventilés) et éviter les envols en privilégiant l'humidification préalable ;
- le contact avec la peau (il faut utiliser des gants et des vêtements appropriés).

Utilisation dans les infrastructures routières

Les cendres volantes sont utilisées pour de nombreuses applications, soit seules soit mélangées à d'autres constituants. Elles peuvent rentrer dans la composition de **ciments** (conformément à la NF P 15-301), de **liants hydrauliques routiers** (conformément à la NF P 15-108), de **bétons** (conformément la NF EN 450) ainsi que dans de nombreux produits brevetés avec des utilisations diverses et notamment le remblaiement de tranchées (produits auto-compactants), le comblement de cavités ainsi que de produits auto-nivelants.

1. Les Cendres volantes silico-alumineuses classiques

Utilisation en terrassement

Les cendres volantes ont souvent été utilisées par le passé pour l'élaboration de remblais, en particulier sur des sols compressibles. En effet, en vrac et humides, les cendres présentent une masse volumique de l'ordre de 1 t/m³. Après compactage sous l'énergie du Proctor normal, on obtient une masse volumique sèche comprise entre 1 et 1,3 t/m³, la teneur en eau optimale variant de 20 à 35 %, ce qui reste sensiblement moins dense que les sols. Les courbes Proctor sont relativement plates, ce qui permet de mettre en œuvre le matériau sous une palette de teneurs en eau large. Cependant, un excès d'eau peut conduire à une perte importante de la portance immédiate.

Plus généralement, les cendres des remblais ne doivent pas être au contact immédiat de l'eau (pas de remblais en zone inondable), compte tenu de leur très forte hydrophilie. Pour éviter les remontées d'eau, il est préférable d'établir un soubassement perméable à l'aide d'une couche de matériau peu fragmentable et peu dégradé (les classes D21 ou D31 selon NF P 11-300 conviennent), cette isolation du remblai pouvant s'avérer indispensable sur certains sites, alors que le drainage s'avère inopérant. Dans le cas de remblais de faible hauteur (saturation plus rapide du volume, sensibilité au gel accrue due à cette présence d'eau importante), certains problèmes de stabilité ont été rencontrés. Il est donc préférable de privilégier des remblais de grande masse.

L'utilisation de compacteurs à pneus est vivement recommandée (Figure 4), l'utilisation de compacteurs vibrants pouvant conduire à des pertes de portance brutales. Pour éviter le ravinement, il faut veiller au bon compactage des flancs (la meilleure solution est d'opérer par sur-largeurs) et à leur protection (terre végétale ensemencée).

A noter que dans le cadre d'une utilisation en remblai, le matériau devra satisfaire aux spécifications définies dans la norme A 05-252 de juillet 1990 - "Corrosion par les sols – Aciers galvanisés ou non mis en contact de matériaux naturels de remblai (sols)" - et plus particulièrement celles relative aux "Critères chimiques et électrochimiques d'acceptation d'un matériau de remblai", à savoir résistivité, pH et teneur en sels solubles.



Figure 4 : illustration d'une utilisation en terrassement (d'après PREDIS Nord-Pas-de-Calais : Guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et des co-produits industriels).

Utilisation en couche de forme

Les fonctions de la couche de forme sont multiples (assurer le compactage des couches supérieures, assurer la traficabilité des engins approvisionnant les matériaux de construction de la chaussée, résister au gel,...). Certaines de ces conditions ne permettent d'envisager les cendres volantes qu'avec un traitement aux liants hydraulique ou une activation calcique, alors que des cendres de foyer (la fraction 0-2 mm) ont souvent été utilisées. Certaines couches de forme en cendres volantes traitées à la chaux et au gypse ont déjà été réalisées, technique également utilisée en couche de fondation (cf. utilisation en structure de chaussée).

Utilisation en structure de chaussée

Trois grands types de formulation sont à ce jour à répertorier en structure de chaussée : les Graves Cendres Volantes Chaux, les Grave Laitier Cendres Volantes Chaux, et les Cendres Volantes Traitées à la Chaux et au Gypse.

Les Graves Cendres Volantes Chaux (GCV : NF P 98-116, février 2000)

Cette technique est utilisée en couche de fondation et/ou couche de base. La chaux est utilisée comme activant. Le guide d'application des normes pour le réseau routier national "Assises de chaussées" (SETRA-LCPC, 1998) impose l'utilisation de mélanges de classe 3 et des résistances en traction directe à 360 jours supérieures à 1,5 MPa. Le catalogue des

structures type de chaussées neuves pour le réseau routier national (SETRA-LCPC, 1998) prend en compte ce matériau dans le cadre de structures semi-rigides (**GCV/GCV**).

Les Graves Laitier Cendres Volantes (GLCV : **NF P 98-116, février 2000**)

Cette technique est utilisée en couches de fondation et/ou couches de base. La chaux est utilisée comme activant. Le guide d'application des normes pour le réseau routier national "Assises de chaussées" (SETRA-LCPC, 1998) impose l'utilisation de mélanges de classe **L73**.

Ce matériau reste aujourd'hui souvent utilisé dans la région Nord-Pas-De-Calais.

Des fiches régionales complémentaires au catalogue de structures type de chaussées neuves pour le réseau routier national (SETRA-LCPC, 1998) ont été réalisées pour des structures semi-rigides (**GLCV3/GLCV3**) et pour des structures mixtes (**Grave Bitume 3/GLCV3**).

Les Cendres Volantes Traitées à la Chaux et au Gypse (**NF P 98-124, mars 1992**)

Cette technique est parfois utilisée en couche de fondation (dans le cas de structures semi-rigides ou inverses). La cendre volante y joue à la fois le rôle de granulats et de liant. Le guide d'application des normes pour le réseau routier national "Assises de chaussées" (SETRA-LCPC, 1998) impose l'utilisation de mélanges de classe 2.

Les formulations habituellement rencontrées sont :

- 91 % de cendres volantes, 4 % de chaux vive, 5 % de gypse ;
- ou 90 % de cendres volantes, 5 % de chaux éteinte, 5 % de gypse.

Il est important de noter les restrictions normatives quant aux quantités des constituants (les dosages en chaux vive doivent être inférieurs à 5%, en chaux éteinte à 6 %, en gypse à 7 %), les proportions indiquées précédemment étant destinées à avoir à la fois une résistance au jeune âge intéressante et éviter des gonflements du mélange dus à la formation d'ettringite.

Cette technique a été très utilisée dans les années 1970-1980 dans la région Nord-Pas-De-Calais (Figure 5). Sa mise en œuvre nécessite une organisation de chantier parfois difficile pour éviter des phénomènes de feuilletage susceptibles d'apparaître en partie supérieure de la couche (ce feuilletage entraînant un décollage avec la couche supérieure qui accélère le vieillissement de la chaussée). Pour éviter de tels phénomènes, il est préférable d'utiliser des compacteurs à pneus, si possible d'enlever les cm supérieurs après compactage, et surtout d'appliquer la couche supérieure (en matériaux non traités ou traités aux liants hydrauliques) avant la prise du matériau (un délai de 4 heures est un maximum).



Figure 5 : ~~mise~~Mise en œuvre de Cendre-Volante-Chaux-Gypse

2. Les cendres -calciques de LFC

Compte tenu du pouvoir hydraulique et/ou pouzzolanique **L8** de ces produits, les valorisations actuellement envisagées et effectivement réalisées utilisent ces propriétés liantes.

Utilisées en structure de chaussée, ces cendres volantes ne sont jamais employées telles quelles mais comme constituant d'un liant pour traitement de sol, de sables ou de graves (d'un ciment, conformément à la norme NFEN 197-1, ou d'un liant hydraulique conformément

à la NF P 15-108) ou d'un mélange lié. . Ces produits font l'objet de brevets ou d'appellations commerciales protégées.

Sources sur le territoire français

Les cendres volantes de charbon sont pour la plupart produites par deux grands groupes Electricité de France (EDF) et la SNET, filiale électrique de Charbonnages de France (CDF), et commercialisées par EDF et Surschiste (pour les cendres volantes de SNET).

Pour ce qui est des cendres volantes silico-alumineuses classiques, la consommation est aujourd'hui plus forte que la production, ce qui conduit à un déstockage. Les sites de production et de stocks existants les plus importants sont situés dans les régions qui ont connu l'exploitation de la houille, soit près des ports qui permettent aujourd'hui l'approvisionnement de charbon importé. Parmi elles, il faut retenir plus particulièrement les régions Lorraine et Nord-Pas-de-Calais, Loire Atlantique, mais aussi Normandie, Région Parisienne, Champagne, Prôvence, Rhône ... On peut estimer que ces stocks sont d'environ **vingt millions de tonnes** au début de l'années 2003, auxquels s'ajoute une production annuelle de variant entre 1 et 1,5 millions de tonnes. Les sites de production sont pour la plupart dans les régions précitées. Pour l'année 2002, la production de la SNET était de 590 000 tonnes et celle d'EDF de 775 000 tonnes. - La part des cendres commercialisées dans la route est en général d'environ un tiers.

Les cendres volantes LFC sont quant à elles produites sur deux sites : Centrale Emile Huchet (Lorraine) et Soprolif (Provence).

Emplois répertoriés

1. En France

Depuis les années 1960, les emplois en construction routière ont été nombreux en France. Pour les cendres volantes silico-alumineuses autrefois produites en plus grande quantité, elles ont été utilisées en remblais et notamment pour des remblais de moyenne hauteur (en 1965, un remblai expérimental de 6 mètres de haut était construit sur la RD 122 du Département du Nord). Une multitude de chantiers pourraient être cités, parmi lesquels de nombreux chantiers autoroutiers (pour l'autoroute A25, les cendres volantes ont été utilisées à la fois non traitées en remblai, et traitées à la chaux et au gypse en couche de forme).

Pour ce qui est des couches de chaussée, les techniques Grave Laitier Cendres Volantes et Grave Cendres volantes sont encore très utilisées aujourd'hui en couche de fondation et de base près des lieux de production. D'autres applications sont également possibles. Des travaux finnois relatent leur utilisation en tant que filler pour enrobé, en vue de réduire les émissions de composés aromatiques au moment de la fabrication et la mise en œuvre des enrobés.

2. En Europe

Les cendres volantes sont également utilisées dans d'autres pays européens. On peut notamment citer l'Angleterre, la Belgique, l'Allemagne, les Pays Bas, la Finlande et dans une moindre mesure l'Espagne. En Angleterre, on recense leur utilisation en remblai et en particulier pour des rampes d'accès à des ouvrages. En Belgique, on peut citer un chantier pilote à Vilvorde (N1) où les cendres volantes ont été utilisées à la fois en couche de forme (traitées avec de la chaux) et en couche de fondation, là aussi avec de la chaux comme liant dans des graves traitées appelées communément béton pouzzolanique [M. Thijs, CR 31/90].

3. Aux Etats-Unis

Les cendres volantes y sont utilisées en remblais, y compris de hauteur conséquente (remblai de 7,6 mètres de haut dans le Minnesota) mais également mélangées avec de la chaux et les boues de désulfuration des fumées (il s'agit d'un produit breveté nommé Poz-O-Tec à [9] [Comité Technique AIPCR des terrassements ,1997]).

Recherches en cours

Compte tenu de l'évolution de la nature des produits, des recherches pour de meilleures valorisation des cendres (Une thèse sur les cendres de LFC a été soutenue en 2002, une autre est soutenue fin 2003, à l'INSA de Lyon, sur l'évaluation de l'impact environnemental de leur utilisation dans différents matériaux routiers, des brevets sont déposés sur des produits dont elles sont les constituant principaux) sont toujours en cours.

Bibliographie [\[10\]](#)

1. Articles, revues, ouvrages, thèses, etc...

- Adamiec P., (1998) - Thèse Université des Sciences et Technologies de Lille, Caractérisation d'une Cendre Volante silico-alumineuse et sa reconstruction – Corrélation avec les caractéristiques géologiques, gîtologiques et minéralogiques du charbon.
- Allonge M., Vivier M., (1966) - Utilisation des Cendres Volantes en techniques routières – Groupe d'étude du Nord-Pas-de-Calais.
- Andrieu P., Colombel J.H. (1976) - Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°83 – Utilisation des Cendres Volantes en technique routière.
- Asociacion de investigacion industrial electrica – selecciones graficas (1970) - Las Cenizas Volantes y sus aplicaciones.
- Carles-Gibergues A., (1978) - Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées – Propriétés hydrauliques des cendres sulfocalciques de Gardanne.
- Carles-Gibergues A., Delsol C., (1994) - Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°193 – Les Cendres Volantes Sulfatées (désulfuration primaire) : Cendres Volantes ou liant routier ?.
- Comité Technique AIPCR des terrassements (1997) - Drainage, couche de forme, Matériaux légers pour remblais.
- Delsol C., Carles Gibergue A., Benaben J-P., (1997) - Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 209– Les Cendres Volantes sulfatées (désulfuration primaire) – Utilisation en technique routière.
- Dron R., (1978) - Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées – L'activité pouzzolanique.
- Dron R., Vautin J-C, Verhee F., (1978) - Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n° 94 – Les différents liants hydrauliques et pouzzolaniques, obtention et mode d'action.
- Erbe M. E. et al. (1999) –International Ash Utilization Symposium ⁽¹⁾ – Evaluation of water quality Conditions Associated with the Use of Coal Combustion Products for Highway Embankments
- Ferrand D. (1998) - Thèse Université de Montpellier II – Cendres Volantes de lit fluidisé circulant, Charbon : cortèges minéralogiques, traitement thermique et matériaux néoformés.
- Hasset D.J. et al., (1999) –International Ash Utilization Symposium ⁽¹⁾ – Mercury release from coal combustion by-products to the environment.
- Jarrige A. Eyrolles (1971) - Les Cendres Volantes – Propriétés – Applications Industrielles.
- Lecuyer I. et al., (1996) – Waste management and Research - Physico-chemical characterization and leaching of desulpharation coal fly ash.
- Meij R. and Winkel H.te, (2001) –International Ash Utilization Symposium ⁽¹⁾ – Healths aspect of Coal Fly Ash.
- PREDIS Nord-Pas-de-Calais (2002): Guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et des co-produits industriels – Juillet.
- Séminaire Européen – Marseille (1997) - Coal Fly Ash : a secondary raw material.
- Sheps-Pelleg S. and Cohen H., (1999) –International Ash Utilization Symposium ⁽¹⁾ – Evaluation of the leaching potential of trace elements from coal ash to the (groundwater) aquifer.

Thijs M., (CR 21/84) - Etat des connaissances relatives à l'utilisation en remblais routiers de cendres volantes de fraîche production provenant d'une ou plusieurs centrales.

Thijs M., (CR 31/90) – Chantier pilote en cendres volantes provenant de la combustion de charbon broyé sur la N1 à Vilvorde.

U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-163-97 (1997) – Radioactive elements in coal and fly ash : abundance, forms and environmental significance, October.

Väänänen V. et al. (2000) – 2nd Eurasphalt and Eurobitume Congress Barcelona - Occupational and environmental hazards of coal fly ash in road paving.

Vivier M., (1971) - Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°54 –Les remblais en Cendres Volantes dans la région Nord.

(1) L'International Ash Utilization Symposium a lieu tous les 2 ans. Il est organisé par le centre de recherche appliquée à l'énergie de l'Université du Kentucky et le département à l'Energie des Etats Unis d'Amérique.

2. Sites Internet

www.surschiste.com

www.flyash.info

Page: 5

[\[1\] Glossaire](#)

Page: 7

[\[2\] Homogénéiser la présentation des références bibliographiques](#)

Page: 9

[\[3\] Supprimer!](#)

Page: 9

[\[4\] A valider!](#)

Page: 9

[\[5\] ?](#)

Page: 11

[\[6\] Glossaire](#)

Page: 12

[\[7\] Glossaire](#)

Page: 12

[\[8\] Glossaire](#)

Page: 13

[\[9\] ?](#)

Page: 14

[\[10\] La bibliographie doit être mise à des normes communes à toutes les fiches.](#)

Annexe 7

Déchets miniers

Avertissement

Schéma d'exploitation

[Revoir qualité de l'image](#)

Types d'exploitations

[Lorsqu'un gisement est peu profond et à faible teneur](#)

Minéraux éléments traces

[Tableaux à réorganiser](#)

Minerais exploités

[Tableaux à réorganiser](#)

Déchets miniers

Résumé

Les déchets miniers peuvent être définis comme tout produit minéral, ou dépôt minéral résultant de la recherche et de l'exploitation minière ou du traitement du minerai. Ces résidus peuvent être, bruts (stériles francs [\[NCI1\]](#), produits minéralisés non exploitables), plus ou moins retravaillés, issus des phases de traitement et d'enrichissement du minerai (rejets de laverie [\[NCI2\]](#)) contenant d'éventuels additifs chimiques [\[NCI3\]](#), minéraux ou organiques, ou artificiels, générés lors de procédés d'extraction de la substance utile lors d'une étape de calcination ou de fusion (cendres, scories).

Le volume et la nature minéralogique des déchets miniers sont très liés au contexte géologique de l'exploitation (roches sédimentaires, métamorphiques, ignées), au type de l'exploitation (mine souterraine, mine à ciel ouvert) et à la nature des procédés développés sur le site d'extraction. Ils sont en majorités constitués de minéraux silicatés (quartz, feldspaths, argiles,...), quelquefois de carbonates (calcite, dolomie,...), plus rarement d'oxydes métalliques et de silicates de hautes températures issus de procédés pyro-métallurgiques [\[NCI4\]](#). Leur homogénéité granulométrique est très variable d'un site à l'autre, d'une zone de dépôt à l'autre. Elle est dépendante, de la nature du substrat extrait, du stade de l'exploitation (découverte, galerie,...), et des procédés mis en œuvres pour concentrer la substance exploitée (broyage, flottation, extraction,...).

Définition

Les déchets miniers peuvent être définis comme tout produit ou dépôt qui résulte de la recherche et de l'exploitation minière ou du traitement du minerai. Ces résidus peuvent être des produits naturels (stériles francs, produits minéralisés non exploitables) ou des produits [artificiels élaborés](#), issus des phases de traitement et d'enrichissement du minerai (rejets de laverie) contenant d'éventuels additifs chimiques, minéraux ou organiques, ou [artificiels](#) générés lors d'une étape de fusion métallurgique (scories [\[NCI5\]](#)).

Textes spécifiques de référence

Sommaire :

1 Spécificité des déchets miniers en matière réglementaire

2. Les principaux textes

3. La directive européenne sur la gestion des déchets miniers (en cours d'élaboration)

Contrairement aux matériaux issus du traitement de déchets (comme les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères ou, de l'extraction des métaux, comme les scories ou, de la démolition d'ouvrages, comme les matériaux de démolition) pour lesquels il existe un savoir-

faire qui a été ou sera avalisé par des guides émanant de la profession—et/ou des textes réglementaires (circulaires, arrêtés) émanant des Ministères intéressés, il n'existe rien au sujet des déchets miniers *sensu lato*. Ainsi, ne seront présentés que des textes qui réglementent l'activité extractive et prennent en compte ses nuisances potentielles pour l'environnement. En l'état actuel de la réglementation, et dans les cas de valorisation en TP des stériles miniers bruts ou peu élaborés, il faudra se référer aux textes concernant les matériaux classiques ainsi que celui considérant les granulats hors normes présentés dans la base d'Ofrir. Dans le cas de stériles provenant de traitement pyro-métallurgiques ou physico-chimiques, il conviendra de se référer aux textes concernant les scories ou les déchets industriels tel que les guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et co-produits industriels (i.e. PREDIS Nord Pas-de-Calais).

1 Spécificité des déchets miniers en matière réglementaire

L'exploitation des mines présente de telles spécificités que le législateur la fait dépendre d'un corpus de dispositions adaptées, baptisé code minier.

La version actuelle du code minier a intégré les dispositions, concernant l'environnement, relatives aux lois :

- sur les déchets (13 juillet 1992) ;
- sur l'eau (3 janvier 1992) ;
- sur les carrières (4 janvier 1993) ;
- sur le renforcement de la protection de l'environnement (2 février 1995) ; les modifications édictées par la loi du 15 juillet 1994 prennent largement en compte les aspects environnementaux.

Le code minier et ses décrets d'application couvrent donc tous les problèmes concernant les résidus provenant de la mine.

Une distinction est apparue, il y a quelques années, faisant rentrer les installations de concentration de minerai (laverie) ainsi que les résidus issus de cette usine dans la catégorie des installations classées pour la protection de l'environnement. Sous l'angle technique, ce changement n'a rien modifié. La différence réside dans le fait que l'ancien exploitant demeure responsable administrativement des résidus de procédés, même après la renonciation à la concession alors que les stériles provenant de la mine *sensu stricto* ne sont plus de la responsabilité administrative de l'exploitant dès lors que la concession a été renoncée.

2. Les principaux textes

Deux textes principaux concernent les sites miniers : le code minier, et la loi du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement.

La notion d'établissements classés comme dangereux, insalubres ou incommodes a été instaurée par la loi du 19 décembre 1917 et la nomenclature des établissements classés a été créée par le décret du 20 mai 1953. La loi du 19 décembre 1917 a été abrogée par celle du 19 juillet 1946, mais la base de la nomenclature du 20 mai 1953 a été maintenue puis complétée. Un certain nombre de rubriques de la nomenclature concerne les activités minières, en particulier :

- n° 89 bis₁ : broyage, concassage, criblage, tamisage mécanique de pierres, cailloux, minerais et autres produits naturels;
- n° 45 - 67₁ : aluminium;
- n° 61₁ : réduction des minerais d'antimoine
- n° 140₁ : chlorures métalliques;
- n° 162₁ : traitement des minerais de cuivre ou de nickel;
- n° 292₁ : minerais carbonatés;
- n° 292bis₁ : agglomérations de minerai de fer
- n° 293 : laveries à minerais ou résidus métallurgiques.

Le décret n°540-2002 du 18 avril relatif à la classification des déchets (JO du 20 avril 2002) prend les résidus miniers en compte dans la rubrique, "Déchets provenant de l'exploration et de l'exploitation des mines et des carrières ainsi que du traitement physique et chimique des minéraux (01)" selon quatre sous rubriques : "Déchets provenant de l'extraction des minéraux

(01 01)", "Déchets provenant de la transformation physique et chimique des minéraux métallifères (01, 03)", "Déchets provenant de la transformation physique et chimique des minéraux non métallifères (01 04)", "Boues de forage et autres déchets de forage (01 05)". Par contre, les déchets provenant de ces activités, comme de la mine elle-même, ont échappé à la réglementation commune des déchets industriels. En particulier, l'arrêté du 18 décembre 1992 relatif au stockage de certains déchets industriels spéciaux exclut de son champ d'application les stockages spécifiques des résidus du traitement des minerais et cela est toujours le cas depuis que cet arrêté a été remplacé par celui du 30 décembre 2002.

Cependant, il faut noter que la responsabilité de l'exploitant d'une installation ayant été à l'origine d'une pollution est reconnue par le législateur (article 81 de la loi n° 95-101) et que la loi n° 94-588 du 15 juillet 1994 a introduit dans le code minier un article le 75-2, qui prévoit l'information d'un acheteur de l'existence d'une mine et des dangers ou inconvénients résultant de son exploitation.

3. La directive européenne sur la gestion des déchets miniers (en cours d'élaboration)

A la suite de graves pollutions régionales induites par des stockages de déchets miniers (Espagne, Roumanie), une proposition de modification de la directive européenne 96/82/CE du conseil du 9 décembre 1996 concernant la maîtrise des dangers liés aux accidents majeurs impliquant des substances dangereuses est actuellement en discussion, pour prévenir et réduire leurs effets négatifs sur l'environnement. Elle a été présentée au parlement européen le 26/09/02. Le texte concerne la gestion des déchets résultant de la prospection, de l'extraction, du traitement et stockage de minéraux de mine ou de carrière actives ou fermées.

Parmi les prescriptions applicables, on soulignera l'obligation par l'exploitant d'établir un plan de gestion des déchets basé sur les principes suivants :

- réduire la production de déchets à la source ;
- encourager leur récupération au moyen du recyclage dans la production d'agrégats ou de matériaux de construction, ou dans des opérations analogues de recyclage (Article 5).

Un plan de prévention des accidents majeurs, l'information du public, une classification des installations d'élimination et des procédures de fermeture sont prévus dans le texte ainsi que l'obligation par les Etats membres de l'U[NCI6]

Origine, formation et élaboration

Sommaire :

1. Les activités génératrices de déchets
2. Les principaux types de déchets miniers

1. Les activités génératrices de déchets

Une mine comprend tous les aménagements, ouvrages et équipements d'extraction, installations de traitement de minerai, *haldes* de stockage, prévisionnels et permanents, de matériaux et/ou de résidus nécessaires pour l'exploitation et la valorisation d'un gisement. Une usine de traitement ou de concentration de minerai comprend les installations nécessaires à la mise en œuvre des procédés physiques et/ou chimiques destinés à conditionner, trier ou séparer les différentes substances minérales. Une usine métallurgique correspond aux procédés de fusion (pyro-métallurgie[NCI7]) ou de mise en solution (hydrométallurgie[NCI8]), mis en œuvre pour produire un métal pur (produit marchand[NCI9]).

Plus de détails : [schéma d'exploitation](#)

1.1 Gisement et stérile : deux concepts complémentaires (BRGM, 1987)

Un gisement se définit en termes relatifs à un marché économique. En effet, un gisement est une masse minérale, le minerai, ayant une concentration en un ou plusieurs éléments métalliques ou non métalliques assez importante pour être exploitable avec profit dans un contexte économique précis. Les caractéristiques du gisement sont déterminées par les processus géologiques et/ou géochimiques responsables de sa création. En effet, un gisement représente une anomalie dans la composition chimique de la croûte terrestre : il contient bien

évidemment une concentration élevée en un ou plusieurs éléments valorisables (Au, Zn, Pb, Ni, Al, etc.); il contient souvent également des concentrations élevées en minéraux ou éléments accompagnateurs pouvant présenter des risques pour l'environnement (pyrite, arsenic, métaux lourds, etc.).

Si le gisement est la cible de l'activité minière, le stérile est le concept complémentaire du gisement, utilisé souvent comme nom ou qualificatif dans le domaine minier. Il s'applique à tout résidu minier dont la teneur en élément valorisable est en dessous de la *teneur de coupure*^[NC110]. Le résidu est donc stérile en terme de valeur économique. Dans certains cas, un résidu stérile stocké à une époque peut être réexploité à une autre, suite à un changement approprié des conditions économiques (cours du marché) ou à l'émergence d'un nouveau procédé plus performant (nouvelles filières de traitement).

Un résidu économiquement stérile peut, par contre, contenir des concentrations en éléments ou composés chimiques polluants (phases minérales naturelles, réactifs de traitement résiduels) élevées par rapport aux concentrations naturellement présentes dans les sols du site. Il peut aussi exister des résidus miniers dont la composition et la réactivité chimique diffèrent peu de celles des sols naturels : ce sont les stériles francs.

Ainsi, en fonction de l'utilisation potentielle de stérile dans les infrastructures routières ou tout opération de travaux publics, la "valeur sémantique" du terme doit être jaugée au cas par cas par des essais environnementaux appropriés (études minéralogique, essais de lixiviation, analyse chimiques, comparaison avec des valeurs repères disponibles).

1.2 Les phases et opérations d'exploitation

Comme le montre le schéma bloc, les opérations mises en œuvre sur un site minier pour exploiter et valoriser un gisement peuvent être divisées en trois (ou parfois quatre) étapes principales :

Plus de détails : [étapes d'exploitation](#)

1. Les travaux nécessaires pour donner accès au gisement, l'ampleur de ces travaux de déblaiement (ou de découverte) dans le cas d'une mine à ciel ouvert et de percement de galeries, puits ou descenderies pour une mine souterraine varieront énormément en fonction des caractéristiques du gisement. Les **mines à ciel ouvert (voir plus de détails)** produisent en général beaucoup plus de stériles (en moyenne de l'ordre de 10 fois plus) que les mines **souterraines davantage sélectives (voir plus de détails)**.

Plus de détails : [les types d'exploitation minière](#)

2. Les travaux liés à l'extraction du minerai tout venant et à son tri préliminaire [pour enrichir le matériau en substance exploitée](#) (éventuellement nécessaire pour minimiser la quantité de roche stérile, ou gangue, présente dans le minerai exploité).

3. Un ensemble de filières de traitement, [qui](#) regroupé dans une usine d'enrichissement (souvent appelée la laverie), [est](#) utilisé pour séparer les phases minérales porteuses des éléments valorisables de la gangue stérile, ~~le~~ [Le](#) produit de l'usine, enrichi en élément valorisable, s'appelle le concentré^[NC111]. Dans la plupart des cas, ce dernier constitue le produit marchand de la mine.

4. Dans certains cas, lors des exploitations anciennes, une fonderie ou une usine de grillage pouvait être édifiée à proximité d'un ou plusieurs sites miniers voisins pour transformer l'élément valorisable du concentré en forme métallique, d'où il a pu résulter l'abandon de produits de grillage/fusion sur le site.

2. Les principaux types de déchets miniers

Chacune des étapes d'exploitation peut être génératrice de résidus miniers, généralement de caractéristiques physiques et chimiques, donc d'impact environnemental potentiel, très différentes. Leurs volumes respectifs, surtout en ce qui concerne les résidus de découverte, seront fonction aussi du type d'exploitation (mine à ciel ouvert, mine souterraine) ; leur composition chimique variera en fonction de la substance exploitée et la nature du gisement. En premier lieu, nous pouvons classer les principaux types de résidu minier en quatre grands groupes qu'il est possible de classer à partir des diverses rubriques du décret n°540-2002 du 18 avril relatif à la classification des déchets :

- les stériles francs de découverte et/ou de traçage ^[NC112] de galerie ;

- les résidus d'exploitation (stériles francs [\[NCI13\]](#) et/ou stériles de sélectivité minéralisés [\[NCI14\]](#)) ;
- les résidus de traitement (rejets de l'usine de concentration [\[NCI15\]](#)) ;
- les autres résidus (scories de grillage [\[NCI16\]](#) ou de fusion [\[NCI17\]](#) du minerai).

2.1 Les stériles francs de découverte

Ce sont les sols et morts terrains qui recouvrent le minerai, décapés pour une mise en exploitation à ciel ouvert ou, dans le cas d'une mine souterraine, les matériaux stériles extraits lors du percement de galeries, puits ou descenderies.

Plus de détails : schéma d'exploitation A, B

Ces résidus contiennent, en règle générale, des teneurs en métaux et en éléments accompagnateurs faibles, de l'ordre de grandeur de l'anomalie géochimique produite par les phénomènes de dispersion naturelle, remaniement mécanique ou diffusion chimique des métaux du minerai dans sa roche encaissante. D'une certaine façon, les caractéristiques physiques et chimiques de ce genre de résidus ne se différencieront pas de celles des matériaux qui auront été remaniés lors de la construction de tout autre ouvrage (autoroute, tunnel, barrage, etc.) dans le même contexte régional.

2.2 Les résidus d'exploitation (minerais pauvres)

Lors de l'exploitation, le mineur opérera un tri précoce entre le minerai vendable et le minerai pauvre où la récupération des substances valorisables sera non économique dans un tel contexte. Ce minerai pauvre pourra être stocké sur place, dans l'attente d'un traitement éventuel si les cours du métal ou autre minéral d'intérêt venaient à monter.

Dans les mines anciennes, la pratique était parfois de le mettre à part, ou de le rejeter de la même façon que les autres résidus de la mine. Dans le cas de mines modernes de *métaux de base*, les stocks de ce type de résidus sont souvent traités en fin d'exploitation.

Plus de détails : schéma d'exploitation C, E

Le caractère plus ou moins disséminé d'un gisement conditionnera également la technique d'exploitation, donc le volume, la nature et l'importance des résidus d'exploitation. Dans un gisement de fer de type disséminé par exemple, l'exploitant placera la teneur limite d'exploitation du minerai à une valeur donnée (par exemple 28% en fer). Cette limite est opérationnelle seulement quand la masse minérale exploitée présentera une gamme continue de teneurs décroissantes en fer suivant les conditions géologiques responsables de sa formation. Le résidu minier dans ce cas aura, en effet, des teneurs en métal très voisines du minerai. Par contre, pour les gisements de type tout ou rien, il y a discontinuité géochimique brutale entre le minerai et sa gangue, celle-ci ne contenant plus que de faibles anomalies en métaux (approchant à peine le centième de la teneur du minerai). Dans ce cas, une exploitation du minerai ne laissera que des rejets pauvres, plus ou moins contaminés par des métaux et métalloïdes accompagnateurs du gisement.

2.3 Les résidus de traitement (tailings)

La valorisation du minerai vendable consiste à effectuer plusieurs opérations de pré-concentration du ou des minéraux économiques. Ces opérations produisent plusieurs types de solides : l'un enrichi en substances valorisables (le concentré [\[NCI18\]](#)) et un ou plusieurs qui en sont appauvris. Dans le cas des **métaux de fait** [\[NCI19\]](#) et de l'or, les résidus issus de l'usine (appelée laverie [\[NCI20\]](#)) sont généralement constitués de particules finement broyées, de sables fins et limons issus du traitement du minerai par gravité ou flottation. Ils sont souvent resédimentés dans des bassins de décantation retenus par des digues à résidus (tailing dams [\[NCI21\]](#)) ou déposés en terril. Afin de réduire les coûts de transport, l'exploitant localisera la laverie en aval de la mine (transport par gravité [\[NCI22\]](#)) et les schlamms [\[NCI23\]](#) (rejets) de laverie seront décantés dans le vallon sous-jacent, à l'amont d'une digue [\[NCI24\]](#) à résidus [\[NCI25\]](#).

Plus de détails : schéma d'exploitation F, G

Les résidus et les boues issus d'une laverie contiennent fréquemment des teneurs significatives en éléments accompagnateurs ou en minéraux secondaires tels que les sulfures de fer, d'arsenic (respectivement pyrite [FeS₂], arsénopyrite [FeAsS], etc.) et leurs produits d'oxydation (sulfates, oxydes métalliques hydratés -essentiellement de fer-...). Ils peuvent contenir également des concentrations résiduelles non négligeables en réactifs (ex.: les molécules

organiques et hydrocarbures potentiellement cancérigènes; cyanures et mercure directement toxiques par ingestion avec effet de dose – voir chapitre sur les risques sanitaires) utilisés pour la séparation et la concentration en métaux valorisables.

2.4 Autres types de résidus

Dans bon nombre d'exploitations **anciennes** polymétalliques [NCI26](Fer, Cuivre, Etain, Plomb/Zinc, Or ...), le minerai ou concentré était grillé ou fondu sur place pour éliminer certains composants (sulfures, par exemple) afin d'arriver à un produit marchand de qualité (Schéma d'exploitation). Dans ces cas, on peut retrouver sur ces sites anciens des tas de **scories** [NCI27] qui forment un cas particulier de rejets. Des **suies** [NCI28] provenant du nettoyage des fours de grillage ou des conduits d'évacuation des fumées y sont fréquemment associées. Ces produits oxydés se retrouvent soit accumulés à proximité de la mine si le grillage était opéré sur place, soit souvent entassés à proximité de la fonderie en contrebas

Plus de détails : [étapes d'exploitation](#)

Caractéristiques physico-chimiques

Sommaire :

1. Caractéristiques minéralogiques
2. Cas particulier du Drainage Minier Acide (DMA) produit par les déchets miniers de mines de sulfures métalliques
3. Compositions chimiques

La grande diversité des déchets miniers produits est donc fonction des substances exploitées, des types de minéralisation et des modes de traitements qui souvent, sur un même site, ont évolué en fonction du temps. Cette variabilité pose le problème de la représentativité des caractéristiques physico-chimiques des déchets rencontrés, leurs compositions minéralogiques et chimiques devenant spécifiques des sites où ils ont été produits. Une deuxième difficulté réside dans l'absence d'inventaire systématique des dépôts de déchets et de leurs caractéristiques (composition, volume, situation...) sachant que plusieurs milliers de sites, la plupart abandonnés, existent aujourd'hui en France. En conséquence, nous proposons de donner quelques exemples types en fonction des substances exploitées.

1. Caractéristiques minéralogiques

Un minerai est composé d'un assemblage de minéraux plus ou moins altérables une fois sortis de leur contexte géologique et soumis aux aléas climatiques et aux conditions physico-chimiques et biologiques de la biosphère (fait). [NCI29] Pour certains de ces minéraux, les produits d'altération sont à la fois solubles (et/ou bioassimilables [NCI30] (fait [NCI31])) et, au-delà d'une certaine concentration, susceptibles de poser un risque pour l'environnement. Les caractéristiques minéralogiques des déchets miniers traduisent en général la composition des minerais qui ont été exploités. On retrouvera donc, en plus faibles concentrations, les principales espèces minérales des minerais.

Plus de détails : [minéraux et principaux éléments](#) traces associés

2. Cas particulier du Drainage Minier Acide (DMA) produit par les déchets miniers de mines de sulfures métalliques [NCI32]

Les déchets miniers générés à partir de mines de sulfures métalliques présentent une grande instabilité des espèces minéralogiques (instabilité chimique). Une fois exposés à l'air libre et à l'eau, la plupart des minéraux sulfurés subissent une bio-oxydation génératrice d'acide sulfurique et de fer ferrique s'accompagnant d'une solubilisation des éléments métalliques (Zn, Pb, Cu, Fe, As, Cd etc.). Ces réactions (**voir plus de détails**) donnent ensuite lieu à des réactions d'oxydation, de dissolution, de précipitation et de recristallisation successives qui produisent de nombreux composés minéraux secondaires (oxy-hydroxydes, oxy-hydroxysulfates complexes, [NCI33] etc.) (Nordstrom *et al*, 1982). Ce phénomène évolutif, plus connu sous le nom de Drainage Minier Acide (DMA), peut être à l'origine de charges polluantes acides et/ou métalliques posant des problèmes de gestion environnementale et géotechnique

lors de la mise en exploitation des ressources minérales ou la valorisation des déchets miniers (Brunet, 2000).

Plus de détails : [réactions et phénomène de Drainage Minier Acide](#)

3. Compositions chimiques

3.1 Les substances chimiques potentiellement toxiques présentes dans les déchets

Les déchets miniers peuvent renfermer des substances chimiques potentiellement toxiques qui proviennent de deux origines principales:

- les minéraux comprenant le *minerai* et sa gangue,
- les réactifs utilisés dans les différentes filières de traitement.

Les déchets potentiellement susceptibles de poser des risques compte tenu de leur composition chimique sont décrits ci-dessous.

Le minerai pauvre

En ce qui concerne les *stériles* minéralisés, le risque potentiel sera déterminé surtout par la teneur en :

- **sulfures de fer** (pyrite [FeS₂], pyrrhotite [FeS], marcassite [FeS₂]) et autres sulfures de métaux, phases minérales à l'origine du DMA (voir infra),
- **phases minérales** comprenant des **éléments traces plus ou moins toxiques** (arsenic, métaux lourds ...).

De ce fait, nous pouvons focaliser notre attention dans la plupart des cas sur les résidus des mines métalliques, et certains minéraux industriels (fluorine [CaF₂], barytine[BaSO₄], pyrite, andalousite [Al₂SiO₅]...).

Si la composition minéralogique des principaux *minerais* extraits en France est relativement simple (**voir plus de détails**), le **spectre d'éléments traces** [INCI34](#) qu'ils renferment est plus large. Parmi les métaux et non métaux cités dans les normes et/ou directives européennes concernant l'évaluation de la qualité des eaux et des *sols* pour différents usages, 11 sont fréquents dans les *gisements* français (As, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, Se, Zn) soit comme constituants principaux de *minerais*, soit comme accompagnateurs dans la gangue.

Plus de détails : [minerais exploités en France et principaux éléments associés](#)

3.2 Les résidus de l'usine de traitement

Peu utilisés comme matière premières secondaires, n'ayant fait l'objet d'aucune évaluation et déconsidérés *a priori* par ce fait, tous les résidus miniers peuvent être actuellement considérés comme source de matériaux. Ainsi, il est nécessaire de donner un panorama exhaustif sur les données disponibles.

La composition chimique des rejets issus du ou des traitements du minerai dépendent du minerai (éléments chimiques majeurs ou mineurs, minéraux présents dans le minerai de départ et se retrouvant dans les résidus...), mais également du procédé utilisé lors du traitement.

Avant le XIX^{ème} siècle, les procédés de concentration de minerai ont peu évolué et les rejets, bien que souvent riches en métaux ou fortement pollués (cas du mercure dans les anciennes exploitations d'or où le minerai était traité par amalgamation), ont eu un impact relativement limité sur l'environnement, car les volumes en jeu étaient très réduits et les minerais traités souvent déjà oxydés. Par contre, l'utilisation à partir des années 1920 de procédés industriels combinant l'utilisation de réactifs chimiques et des broyages fins, comme par exemple la flottation des sulfures, a augmenté considérablement les risques pour l'environnement.

La finesse et l'homogénéité de la taille des particules des **résidus de l'usine de traitement** les rendent particulièrement susceptibles à une dispersion dans l'environnement (dans le cas d'un lieu de stockage mal conçu et non réaménagé).

3.3 Les principales techniques et filières de traitement

- *Procédés de tri physique* :

Basés sur les techniques utilisant la densité des particules ou leur susceptibilité magnétique, leur conductivité, etc., ces procédés se caractérisent d'une part par un broyage assez grossier du minerai (les tailles des particules vont de quelques mm jusqu'à 0,2 mm environ) et d'autre part par une absence de réactifs.

- *Procédés physiques de séparation* :

La flottation est la principale technique de séparation physico-chimique. Elle utilise une grande variété de réactifs chimiques, ~~(click 7)~~, principalement pour modifier les états de surface (hydrophobie, hydrophilie) des particules. Elle nécessite également des particules suffisamment petites, de taille inférieure à 0,2 mm. Les rejets de tels traitements, au départ liquides, sont donc des produits fins (boues) renfermant des réactifs organiques et minéraux résiduels.

Les réactifs utilisés en flottation sont utilisés à des doses allant de quelques dizaines de grammes à quelques kg par tonne de minerai et se classent en :

- *moussants* (tensioactifs organiques),
- *collecteurs* (tensioactifs organiques de type xanthates et dithiophosphate),
- *agents modifiant le pH* (acide sulfurique, chaux...),
- *activants et dépresseurs* (produits minéraux de type sels métalliques: bichromate, CuSO_4 , ZnSO_4 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ etc., ou produits organiques de type cyanure de sodium ou amidon).

Ces réactifs de flottation se retrouvent, au moins en partie dans les résidus issus de ces traitements.

Plus de détails : [réactifs utilisés en traitement des minerais](#)

- *Procédés chimiques d'extraction/concentration* :

De tels procédés recouvrent à la fois les techniques de *lixiviation (dissolution)* et celles de *recupération des éléments dissous (précipitation, céméntation...)* et se caractérisent par une utilisation importante de réactifs chimiques (acides, bases, oxydants, complexants...). En France, ces procédés chimiques ont principalement été employés pour l'uranium et pour l'or. Pour ce dernier, ils correspondent aux procédés de cyanuration et d'amalgamation.

- ~~La~~ *cyanuration* [NCI35] repose sur une mise en solution de l'or et de l'argent, par complexation par du cyanure de sodium ou de potassium. Ce réactif très toxique est utilisé à des teneurs de 0,02 à 0,08% et se retrouve dans les résidus (tailings). En contact avec l'atmosphère, il se détruit par action photochimique. ~~;~~

- ~~L'~~ *amalgamation* [NCI36] consiste à utiliser du mercure pour fixer de l'or. La présence de ce réactif dans les rejets solides constitue l'un des principaux dangers associés aux anciens résidus d'exploitation de l'or.

- ~~Les~~ *Procédés thermiques* ~~procédés thermiques~~ [NCI37]:

~~Ils~~ consistent principalement en grillages (oxydation à haute température) en présence de chlore, de minerais ou de concentré de minéraux. Ces procédés engendrent non seulement des produits de grillage (scories), mais également des suies et nécessitent parfois l'ajout de réactifs (fondants : fluorine, borax $[\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}]$, cryolite $[\text{Na}_3\text{AlF}_6]$...).

Caractéristiques géotechniques

Issus du milieu naturel, le "déchet minier" peut être une roche simplement excavée, ou faire l'objet d'un certain degré d'élaboration : produit broyé puis traité par voie chimique, ou par voie pyro-métallurgique. Il peut donc être traité comme un matériau naturel classique, un Déchet Industriel Banal (déchet non dangereux au sens de la classification des déchets) ou un Déchet Industriel Spécial (déchet dangereux au sens de la classification des déchets). Ainsi, dans le cas de valorisation en BTP des stériles miniers bruts ou peu élaborés, on devra se référer aux textes concernant les matériaux classiques, ainsi que celui considérant les granulats hors normes présenté dans le site Ofrir. Dans le cas de stériles provenant de traitement pyro-métallurgiques ou physico-chimiques, il convient de se référer aux textes concernant les scories ou les déchets industriels aussi présentés dans le site Ofrir.

De manière générale, les déchets miniers étant dans la grande majorité des cas des matériaux naturels comparables aux sols et roches classiquement utilisés pour la construction des ouvrages routiers en terre les essais de caractérisations géotechniques ainsi que les conditions de mises en œuvre figurant dans le GTR [NCI38] peuvent s'appliquer.

Leur caractérisation en vue de leur classification s'effectuera par détermination:

- de leurs paramètres de nature, à savoir granularité (normes NF P 94-056 et 057), argilosité (normes NF P 94-051, NF P 94-68, NF P), masse volumique (norme NF P 94-064);
- de leurs paramètres d'état tel que l'état hydrique (NF P 94-050, NF P 94-078);
- de leurs paramètres mécaniques et autres comme le coefficient Los Angeles (NF P 18-573), le Micro Deval Humide (NF P 18-572), la fragmentabilité (NF P 94-066), la dégradabilité (NF P 94-067), la teneur en éléments solubles ou organiques (NF P 18-586, NF P 94-055).

Pour leur réemploi, on appliquera les conditions de la classe de sols à laquelle ces matériaux sont assimilables compte tenu de leur nature et état.

Cependant, compte tenu de l'origine diverse de ces déchets miniers (issus du décapage, de découverte, d'excavation, de traitements physiques ou chimiques, ...), il y a lieu de vérifier par une étude spécifique, au cas par cas, que certains éléments particuliers en forte proportion ne viennent pas perturber le comportement géotechnique normalement attendu pour un sol naturel classique. En particulier on vérifiera:

- que la présence de résidus de produits de traitement par flottation (collecteurs, déprimants, moussants, ...) ou autres ne viennent pas modifier le comportement général du matériau vis à vis de l'eau;
- que la répartition granulométrique ne présente pas d'aberration;
- que la présence de sulfures, d'éléments solubles (chlorures, sulfates, nitrates) ou organiques ne viennent pas engendrer des risques de gonflement, de déstabilisation d'ouvrage ou perturber les prises dans le cas de traitement à la chaux, au ciment ou aux liants hydrauliques;
- etc.

Caractéristiques environnementales

Sommaire :

1. Les facteurs déterminants
2. Les principaux modes de transfert des pollutions

En l'absence de données disponibles sur les caractéristiques environnementales d'un résidu minier utilisé en T.P., seuls les aspects ayant trait à l'exploitation minière seront présentés.

1. Les facteurs déterminants

La plupart des impacts qu'un résidu minier peut avoir sur l'environnement, résulte d'une combinaison de l'éventuel mouvement dans l'espace de ses particules solides et de la potentielle **capacité polluante** de ses composants chimiques par transport en solution.-

Un contaminant peut être soit un élément ou phase minérale présent d'origine dans le minerai, soit un réactif chimique ajouté lors des filières d'enrichissement. Les composés contaminants dépendront donc de la **substance exploitée** et de la **nature minéralogique** du minerai. Dans le cas des phases minérales contaminantes, l'éventuel impact environnemental sera fonction des différences en ce qui concerne la quantité et la réactivité des phases minérales d'un résidu stocké dans l'environnement par rapport à la composition et la réactivité des sols du site. Par exemple, les éventuelles **haldes de minerai pauvre** de certaines mines de métaux de base et d'or, et davantage encore les résidus de l'usine de traitement (laverie), peuvent contenir des quantités de pyrite et de métaux lourds beaucoup plus élevées que le sol. En contact avec l'oxygène atmosphérique et soumis à la lixiviation par les eaux de pluie, ces résidus peuvent réagir chimiquement et biologiquement et provoquer le **D M A**.

Plus de détails sur : [les facteurs déterminants](#)

2. Les principaux modes de transfert des pollutions

Les réactifs chimiques consommés par les différentes techniques de traitement d'un minerai, s'ils ne sont pas dégradés lors de ces procédés, se retrouveront en sortie de l'usine soit dans un circuit d'eau usée, soit déposés dans un lieu de stockage de résidus solides (généralement humides).

Pour évaluer l'impact potentiel des résidus miniers, des typologies sont proposées. La typologie proposée traite plus particulièrement des résidus résultant des exploitations de substances métalliques, exception faite de Fe et Al.

Il faut néanmoins souligner le fait que, dans le cadre d'une synthèse, seul un niveau typologique assez superficiel peut être présenté. En effet, la nature hautement complexe à la fois des caractéristiques des sites miniers anciens et modernes, de leurs situations environnementales, de l'âge de leurs résidus, etc. rend difficile l'utilisation d'une telle typologie à des fins décisionnelles. Comme cela a été signalé à plusieurs reprises, les particularités de chaque site et de chaque type de résidu peuvent être appréciées correctement seulement au moyen d'un constat direct, soit l'évaluation de pollutions ou d'instabilités physico-chimiques avérées sur le site où sont stockées les haldes susceptibles de fournir des matières premières secondaires, puis par caractérisation des résidus par analyses chimico-minéralogiques (identification des polluants potentiels, spéciation, susceptibilité à être mobilisés,...).

Plus de détails : [typologie et impact environnemental potentiel](#)

Deux sources potentielles d'éléments et/ou de composants contaminants ont été évoquées :

- les *phases minérales* présentes naturellement dans le minerai et sa gangue;
- les *réactifs* introduits lors des diverses filières de traitement mises en œuvre dans une usine d'enrichissement.

Ces éléments et/ou composants contaminants peuvent être éventuellement retrouvés principalement dans deux types de résidus miniers :

- les *résidus minéralisés* mais non traités (stériles pauvres) – phases minérales seulement;
- les *résidus issus de l'usine de traitement* – phases minérales et réactifs.

Plus de détails : [typologie des stériles minéralisés et impact potentiel](#)

La **substance valorisable** et son **contexte minéralogique**, c'est-à-dire la composition du minerai et sa gangue, auront un effet déterminant sur la nature des impacts générés, par la réactivité et la quantité des phases minérales résiduelles et réactifs chimiques employés. Ces paramètres peuvent varier énormément dans le temps suite à des variations dans la nature du gisement et les procédés de traitement utilisés.

Les **quantités** (absolues et relatives) des différents types de résidus miniers seront fonction des caractéristiques du gisement et de la méthode d'exploitation utilisée (mine à ciel ouvert, mine souterraine). Cette dernière, en conjonction avec le contexte environnemental particulier du site minier, déterminera en grande partie les **impacts esthétiques** que les résidus miniers peuvent potentiellement présenter pour l'environnement.

Pour conclure, les données qui ont été rassemblées sur la réactivité potentielle des résidus miniers (évaluée en première approche par les résultats de l'essai de lixiviation NF X31-210) montrent pour certains de ces matériaux des anomalies en sulfates et en métaux lourds qui les rendraient impropres à toute utilisation en techniques routières.

Plus de détails : [essai de lixiviation et résidus miniers quelques cas](#)

Aspects sanitaires

Sommaire :

1. Facteurs influençant l'absorption et la bio-disponibilité des métaux dans l'environnement
2. Exemples d'éléments chimiques relargués par les déchets miniers

Les effets toxiques des déchets miniers restent encore aujourd'hui mal connus, principalement à cause du manque de données épidémiologiques. Les impacts potentiels sur la santé humaine sont en grande partie causés par la bioaccumulation des métaux lourds ou autres éléments toxiques dans la chaîne alimentaire. Le risque sanitaire induit par la bioaccumulation dans la chaîne alimentaire dépend spécifiquement de chaque métal ou de l'association des métaux en question. Il peut ensuite être modifié ultérieurement par d'autres facteurs liés au contexte géologique (acidité, dureté de l'eau, etc.) qui affecte l'évolution du métal. L'environnement biologique peut également avoir une influence sur la toxicité : à noter en particulier la

méthylation de certains métaux (surtout le mercure) en condition anaérobie qui produit des composés extrêmement toxiques- (Moore & Ramamoorthy, 1984).

1. Facteurs influençant l'absorption et la bio-disponibilité des métaux dans l'environnement

Les dangers que posent les métaux pour la santé reposent dans une grande mesure sur la forme sous laquelle les cellules cibles des organismes vivants les absorbent. Par exemple, le mercure organique présent dans le poisson sous forme de méthylmercure consommé tous les jours pendant une longue période, est beaucoup plus dangereux que le mercure inorganique à la même concentration. Par contre, l'arsenic inorganique semble plus dangereux que certains composés méthylés d'arsenic, comme ceux trouvés dans les organismes marins. L'arséniate ou l'arsénite, que l'on peut trouver dans les vins provenant de régions où le sol est riche en arsenic, est très toxique. En raison de leurs propriétés chimiques, les métaux ou composés métalliques peuvent se lier à divers ligands pour former des complexes ayant une activité biologique propre. En général, les ions des métaux lourds sont plutôt réactifs et peuvent former des complexes avec un certain nombre de ligands inorganiques ou organiques contenant des résidus sulfhydrylés ou un groupement carboxyle ou phosphate. Dans l'eau, l'adsorption de métaux sur des particules en suspension influe sur la teneur en métaux, mais la présence de substances humiques ou de composés organiques libérés par des algues planctoniques modifie considérablement la forme sous laquelle les métaux se manifestent. La salinité de l'eau influe également sur la différenciation des métaux (c'est-à-dire la nature des différentes formes chimiques qu'un métal peut prendre dans un milieu donné et les proportions de ces formes) et sur leur solubilité. Par conséquent, dans les écosystèmes aquatiques, la biodisponibilité des métaux repose non seulement sur la charge externe de métaux, mais également sur les caractéristiques chimiques de l'eau dans laquelle ils sont déversés. De même, dans les produits alimentaires, les métaux se lient surtout à des ligands organiques (acides aminés et peptides courts) et se manifestent sous forme de divers complexes chimiques. La cinétique de l'absorption des cations métalliques ne reflète pas nécessairement le comportement de la totalité du métal qui se trouve dans un milieu, car le taux d'absorption peut varier considérablement selon le composé métallique ou la forme du métal. Après l'absorption, la diffusion dans l'organisme des métaux qui sont parvenus au plasma, ainsi que les interactions des métaux absorbés par les cellules avec les composantes intracellulaires, reposent aussi dans une grande mesure sur la forme chimique de ces métaux.

2. Exemples d'éléments chimiques relargués par les déchets miniers

A titre d'exemple, nous citerons quelques éléments le plus souvent rencontrés à l'aval hydraulique de dépôts de déchets miniers.

L'arsenic

Les concentrations en arsenic peuvent être élevées près des mines, des fonderies et des usines de traitement de minerais (Libaude et al, 1992). D'après les études épidémiologiques, l'arsenic figure dans la classe 1 ou A des substances cancérigènes (CIRC, classe 1, 1980, US-EPA, classe A, 1988; <http://epa.gov/iris/subst/0278.htm>).

Le cadmium

Le cadmium est classé B1 parmi les substances cancérigènes, selon des études sur les animaux dans lesquelles le métal avait été soit inhalé, soit injecté en intramusculaire ou en sous-cutané.

Le plomb

Le plomb est considéré comme un produit cancérigène de classe B2. Les eaux d'exhaure des mines ou les déchets miniers relarguent des composés inorganiques du plomb, mais à la fois les composés organiques et inorganiques posent de sérieux risques pour la santé.

Utilisation dans les infrastructures routières

Sommaire :

1. Déchets provenant de mines métalliques (métaux non ferreux)
2. Déchets provenant de mines de fer
3. Déchets provenant de mines ayant exploité d'autres substances (fluorine, barytine, andalousite, potasse...)

L'étude menée en 1983 par le BRGM en collaboration avec l'ANRED (aujourd'hui l'ADEME) sur les expériences nationales de réutilisation des déchets miniers (Carly, 1983) souligne l'existence de trois grands types de valorisation:

- en cimenterie : les déchets (huit dépôts identifiés) ont été réutilisés comme correctifs chimiques, notamment en fonction de leur contenu en fer, ou comme matière première par cette branche industrielle ;
- en travaux public et travaux routiers, la réutilisation la plus fréquente en empierrement de chemins (plusieurs dizaine de cas répertoriés) et en enrobés ;
- en remblayage, sous forme de plate forme, de tranchées EDF - GDF ou d'adduction d'eau (plusieurs dizaines de cas connus).

Il existe à notre connaissance peu d'études et pas d'inventaires récents des retours d'expérience concernant la réutilisation de déchets miniers. Quelques inventaires ont été réalisés par le BRGM au début des années 80 (Carly, 1983 ; Rougeaud et Sauter, 1984). Ce manque de données est dû :

- à l'absence de documentation spécifique (tests, quantification, destinations...) relative aux expériences de réutilisation concrètes ou projetées ;
- aux difficultés d'obtenir de la majorité des organismes officiels ou des exploitants particuliers, les renseignements en leur possession.

Les travaux faits, inventaire en cours de réalisation des anciens sites miniers de la région Midi-Pyrénées (Bouroullec et al, 2001; expérience qui sera étendue en 2003-2004 à tout le territoire métropolitain), et la base DECHMINUE (Thomassin *et al.*, 2001), révèlent cependant que de nombreuses réutilisations existent dans le domaine des travaux publics, mais que la plupart a été faite sans les caractérisations préalables et autorisations nécessaires (traces d'emprunts sur les dépôts de matériaux) (Cottard et al., 2002).

1. Déchets provenant de mines métalliques (métaux non ferreux)

D'une manière générale la réutilisation de déchets (stériles, résidus de traitement et scories) générés par les mines métalliques de non ferreux (Plomb-Zinc, Cuivre, Etain-Tungstène, Or-Argent, Antimoine, etc.) est prohibée, compte tenu de la présence dans les déchets de sulfures résiduels et d'éléments potentiellement toxiques. Comme nous l'avons vu précédemment, ces déchets chimiquement instables, une fois exposés à l'air libre, présentent en effet la particularité de générer de l'acide sulfurique et des métaux solubilisés et une grande quantité de sulfates de métaux. Ces caractéristiques chimiques en font des matériaux évolutifs qui pour de multiples raisons (risques de gonflement, dispersion de contaminants dans le milieu naturel pouvant présenter un risque pour les eaux de surface ou souterraines et donc pour la santé) ne peuvent être valorisés en techniques routières.

2. Déchets provenant de mines de fer

Les déchets générés par les mines de fer ne contiennent pas de sulfures et peuvent présenter des caractéristiques de matériau de substitution en construction routière, en remblais, ou pour d'autres utilisations.

Plusieurs emplois sont répertoriés en Loire Atlantique (ancienne mine de Rouge), dans le Calvados (ancienne mine de Soumont) et en Lorraine (ancienne exploitation de Metzange d'Usinor).

3. Déchets provenant de mines ayant exploité d'autres substances (fluorine, barytine, andalousite, potasse...)

Ces déchets contiennent peu ou pas de sulfures, ce qui peut les rendre éventuellement utilisables comme matériaux de substitution en construction routière ou en remblais. Plusieurs cas de réemploi ont été répertoriés à partir des mines de fluorine (CaF_2) et d'andalousite (SiO_2 , Al_2O_3).

- Certains déchets de ce type issus d'exploitations générant de très grandes quantités de stérile ont fait l'objet, il y a déjà plusieurs dizaines d'années, d'études spécifiques ou de chantiers

pilotes pour mieux connaître leurs conditions de valorisation et les risques posés par leur emploi dans la route. A l'exception des stériles provenant de l'exploitation du charbon (voir rubrique schistes houillers), aucune de ces études ou de ces tentatives expérimentales n'a débouché sur un réemploi à grande échelle.

Citons par exemple les déchets des mines de potasse d'Alsace (30 millions de tonnes). Le traitement de ce minerai, dont l'objectif principal était la production de potasse pour la fabrication d'engrais, comporte l'extraction dans un premier temps du chlorure de potassium puis du chlorure de sodium. Le résidu issu de ce traitement a fait l'objet de diverses appellations (schistes des mines de potasse selon le GTR, résidus R2 selon le producteur, ...). Il a l'aspect d'un sable limoneux 0/5mm à grains anguleux constitué de 30 % à 40 % d'éléments silicatés, de 30 % d'éléments carbonatés et de 20 à 30 % d'anhydrite. La teneur en chlorure de sodium est de 5 % à 10 %. En quelques semaines, l'anhydrite de ces "schistes" se transforme en gypse et s'accompagne d'une prise en masse du matériau avec un faible gonflement (2 % environ). Il est à noter que la présence de chlorure de sodium donne à ce matériau un caractère non gélif selon les conditions de l'essai de gonflement au gel (NF P 18-593 et NF P 98-234-1).

Le LRPC de Strasbourg a suivi divers chantiers expérimentaux d'utilisation de ces schistes de mine de potasse en remblai et couche de forme. Ces opérations ont montré:

- que la mise en œuvre se faisait sans difficulté particulière;
- que la prise en masse du matériau frais permettait de réaliser des couches de forme se rigidifiant avec le temps et capable de supporter un trafic lourd.

De son côté, la DDE du Haut Rhin a utilisé à titre expérimental plus de 20.000 m³ de ce matériau en noyau de remblai pour une voie rapide. Ces travaux ont confirmé les constatations précédentes.

L'obstacle essentiel à l'utilisation intensive à l'heure actuelle de ces schistes des mines de potasse réside plus dans l'incertitude quant aux risques de pollution (en particulier par les sulfates) qu'à d'éventuels problèmes de nature géotechnique.

Sources sur le territoire français

Sommaire :

1. Estimation des quantités de déchets miniers en France
2. Répartition géographique

1. Estimation des quantités de déchets miniers en France

On dénombrait en 1996, 120 principaux sites d'extraction de minerais métalliques et de minéraux industriels et donc de production de déchets. Hors hydrocarbures, charbons, uranium et sel, leur nombre n'est plus que de 80, et une grande majorité d'entre eux concerne les minéraux industriels. En 1998, l'exploitation minière métallique en France métropolitaine est réduite à quelques substances (or, fer, fluorine et barytine) et à une douzaine de sites.

Réaliser une estimation précise des tonnages de déchets miniers produits et des stocks existants est possible mais nécessite un inventaire site par site, travail important qui aujourd'hui n'a pas encore été réalisé. En effet, pour connaître précisément le volume des résidus miniers, il faut consulter les archives des mines (lorsqu'elles existent encore !), évaluer les productions, les méthodes de traitement et mesurer les quantités réelles de déchets laissées sur le site, en sachant qu'une partie de ceux-ci a pu être réutilisée comme minerai à basse teneur ou comme matériau de remblai ou d'empierrement. Souvent, l'érosion naturelle a déplacé une partie des résidus, en particulier lorsque ceux-ci sont stockés en bordure de cours d'eau (cas fréquemment rencontrés dans le Massif Central et les Pyrénées).

Une évaluation récente (BRGM, 1997) destinée à donner une image d'ensemble des volumes de déchets en jeu, a été réalisée pour le compte du Ministère de l'Environnement. Les résultats permettent d'estimer très approximativement le volume global cumulé **des résidus de traitement** produits par les exploitations minières en France depuis la révolution industrielle à

environ **130 millions de tonnes pour les résidus de métaux non ferreux** (sauf l'aluminium) (Tableau 1) ;

- pour le fer, l'estimation est difficile. Les résidus pourraient représenter environ 4 milliards de tonnes, en grande partie réutilisés pour le remblayage des mines;

- pour les minéraux industriels (autres que barytine et fluorine) et la bauxite (aluminium), aucun chiffre n'a été avancé pour l'instant.

Substances	Production cumulée	Teneurs	Résidus globaux
	métal ou minéral	(moyenne pour calcul)	Tous résidus compris
Pb – Zn (+ produits)	1 800 kt Pb sous-2 350 kt Zn	5 à 15 % Pb + ZN (10 %)	45 Mt
Pyrite	29,6 Mt pyrite	50 % à 70 % FeS ₂ (60 %)	10 Mt
Cu	70 kt Cu	1 à 3 % Cu (1,5 %)	5 Mt
Au	161 t Au	qq g/t à 15 g/t (8 g/t)	20 Mt
W	26,6 kt WO ₃	0,3 – 1,5 % WO ₃ (1 %)	2,5 Mt
Sn	11,8 kt Sn	0,1 à 1,5 % Sn	2 Mt
Sb	130 kt Sb	(2,5 % ?)	5 Mt
Fluorine	10,4 Mt F ₂ Ca	30 % à 60 % F ₂ Ca (40 %)	25 Mt
Barytine	6,5 Mt BaSO ₄	30 à 70 % BaSO ₄ (40 %)	15 Mt
		TOTAL	130 Mt

Tableau 1 : Evaluation théorique du tonnage des résidus de traitement de la mine métallique en France (source : BRGM, 1997)

2. Répartition géographique

Des dépôts de résidus miniers existent dans presque toutes les régions de France. Leur répartition et leur composition sont fonctions des substances exploitées, étroitement liées au contexte géologique (Beziat et Bornuat, 1995). Ainsi, très schématiquement, on trouvera :

- les mines métalliques (métaux non ferreux hors aluminium) principalement localisées dans les massifs hercyniens anciens (Massif Central, Massif armoricain, Vosges, Estérel..) et les Pyrénées ;
- les mines de fer les plus importantes concentrées dans le bassin sédimentaire lorrain ;
- les mines de bauxite (aluminium) essentiellement situées en Provence ;
- les mines de sel (halite et potasse) localisées pour les plus importantes dans le bassin salifère lorrain et alsacien ;
- les mines et carrières de minéraux industriels (incluant fluorine et barytine) dispersées dans tous les bassins sédimentaires (Bassins Parisien, Aquitain et Rhodanien) et également sur le pourtour des massifs anciens et des chaînes alpines.

Emplois répertoriés

Actuellement il n'existe pas d'inventaire de l'emploi fait des déchets minier en technique routière.

Recherches en cours

Pour ces matériaux, en France, aucune recherche active n'est signalée portant sur leur utilisation dans les infrastructures routières. Signalons quand même des travaux de recherche sur la stabilisation des déchets miniers en vue de stabiliser les métaux lourds, sur les aménagements pour conforter et isoler des haldes, et en exploitation sur la stabilité des formules à bases de liants hydrauliques en vue de combler les excavations à l'avancement des travaux d'extraction.

Bibliographie[\[NCI39\]](#)

Références citées dans le texte

ADEME (2002) Evaluation de l'écocompatibilité de scénarios de stockage et de valorisation des déchets » - Editions- Réf. 4445 –

BRGM (1997) – Les résidus miniers français : typologie et principaux impacts environnementaux potentiels. Rapport R39503, 85 p.

BRGM, INERIS, MATE (2000) - Gestion des sites pollués - Diagnostic approfondi, Evaluation détaillée des risques.

Béziat P., Bornuat M. (1995) – Carte minière de la France métropolitaine. Echelle 1/1 000 000. Notice explicative. Rapport de Service Public, BRGM, Service Minier National, 102 p.

Bouroullec I., Cottard F., Dutartre Ph., Fleury L., (2001) - Notice d'explication de la base de données sur les anciens sites miniers de Midi-Pyrénées. Rapport BRGM/RP-51211-FR., 30p., 2 ann.

Brunet J. F. (2000) - Drainages Miniers Acides - Contraintes et Remèdes - Etat des Connaissances. BRGM/RP-50504-FR, 299 p., 15 fig., 36 tabl., 19 phot., 10 ann.

Carly R. (1981) – Inventaire des dépôts et rejets miniers. Compte rendu de l'activité 1980. Rapport BRGM 81 SGN 208 ENV, 76 p. (112 mines métalliques et 86 mines F, Ba, amiante répertoriées).

Carly (1983) – Expériences nationales de réutilisation des déchets miniers. Convention ANRED-BRGM n° 82.54.064. Rapport BRGM 83 SGN 839 ENV, 20 p, 2 ann.

Cottard F., Bouroullec I., Dutartre Ph. Fleury L. (2002) – Audits environnementaux de six mines fermées ou abandonnées de la région Midi-Pyrénées. BRGM/RP-51538-FR, 76 p., 8 fig., 20 tab., 3 ann.

Libaude J., Maroncle J.L., Morin D., Védrine H. (1992) – Halde aurifères de l'ancienne mine du Châtelet (Creuse). Caractérisation et évaluation des risques liés au dépôt. Rapport BRGM R35105, 52 p.

Honma Y. (1988) – Dace (*Leuciscus* spp.) and other syprinid fish as biological indicators of Hg pollution – in: Yasuno M. and Whitton B.A. (eds.), Biological Monitors of Environmental Pollution: *Tokai University Press, Tokai*, pp. 49-84.

Moore J.W. and Ramamoorthy S. (1984) – Heavy metals in natural waters – Applied monitoring and impact assessment. – *Springer-Verlag, New York*, 268 p.

Nordstrom D.K., Alpers C.N., Ptacek C.J., Blowes D.W. (2000) - Negative pH and extremely acidic mine waters from iron Mountain, California. *Environment Science and Technology*. Vol. 13 n° 5, p. 254-258.

Rougeaud J., Sauter M. (1984) – Evaluation des possibilités de réutilisation des déchets miniers de la division minière du Massif central. Rapport BRGM 84 SGN 095 ENV (229 sites visités dont 103 sites de déchets miniers répertoriés, localisés : Division minière Massif central, 87 000 km²).

U.S. Environmental Protection Agency (EPA) (1993) – Integrated Risk Information System (IRIS).

Pour en savoir plus

Allan R.J. and Salomons W. (1995) – Heavy metal aspects of mining pollution and its remediation. *Journal of Geochemical Exploration Spec. issue*, vol. 52, n° 1 and 2, 284 p.

Baroudi H., Trolly G. (1996) – L'environnement dans les mines, chapitre X dans le "Mémento des Mines et Carrières – 1996), p. 505-525.

Barrès M. (1979) – Comportement hydrodynamique et évolution chimique des déchets miniers fins en décharge (effets sur l'environnement). Etude de la digue à stériles de St Salvy-de-la-Balme (Tarn). Rapport BRGM 79 SGN 662 HYD, 91 p.

Collectif (1972 – 1986) – Cartes des gîtes minéraux de la France au 1/500 000. 8 feuilles. Ed. BRGM.

Davies B.E. (1983) – Heavy metal contamination from base metal mining and smelting: implications for man and his environment. In: Applied environmental geochemistry, Academic Press, I. Thornton Ed., 501 p.

Fortescue J.A. (1980) – Environmental Geochemistry. A Holistic approach. Ed. Springer Verlag, Ecological studies, vol. 25, Ed. Billings Durham, USA, 347 p.

Margron P., Maubert F., Sionneau J.M. (1983) – Etude technico-économique pour l'implantation d'une digue à stérile à Rouez (Sarthe). Rapport BRGM 83 SGN 096 GEG, 64 p.

Maubert F., Sauter M., Carly R. (1983) – Inventaire des expériences de réaménagement de mines. Rapport BRGM 83 SGN 241 ENV (15 sites réaménagés décrits).

Maubert F. (1983) – Constat d'impact de deux anciennes exploitations minières : 1. Le cas de la mine de La Croix de Pallières (Gard). Rapport BRGM 83 SGN 583 ENV, 55 p.

Maubert F. (1982) – Constat d'impact de trois mines souterraines : 2. Le cas de la mine de Salau (Ariège). Rapport BRGM 82 SGN 866 ENV, 81 p.

Maubert F., Sauter M. (1983) – Impacts résiduels d'anciennes mines. Rapport BRGM 82 SGN 249 ENV, 16 p. 22 fiches de constats sur 22 exploitations du Massif central.

Pasava J., Kribek B., Zak K. (1995) – Mineral deposits: from their origin to their environmental impacts. Proceedings of the Third biennial SGA meeting (Prague, République Tchèque), août 1995 ; A.A. Balkema (Rotterdam), p. 1018.

PNUE (1991) – Environnement et exploitation minière de certains métaux non ferreux (Cu, Ni, Pb, Zn, Au) : guide technique. PNUE, Paris, p. 122.

Chermette A. (1960) – Les ressources de la France en Spath Fluor. Ed. Technip, BRGM, 52 p.

Lajoinie J.P., Laville P. (1979) – Les formations bauxitiques de la Provence et du Languedoc. Dimension et distribution des gisements. Mémoire du BRGM n° 100.

Les mines de fer françaises – Rapports d'activité de la Chambre Syndicale des Mines de fer de France (1876 – 1991).

Les ressources minières françaises. Annales des mines. Juillet-août 1980, 186^{ème} année, n° 7-8, 191 p. Actes du XXVIème Congrès Géologique International, Paris.

Statistiques de l'Industrie Minérale – Annales des Mines. Ministère de l'Industrie et de la Recherche. 1960 - 1977.

Bourdier G., Lambert J., Sionneau J.P. (1981) – Mine d'or du Bourneix (Haute-Vienne). Etude d'impact pour les installations classées. Rapport BRGM 80 SGN 867 ENV, 65 p.

Carly R. (1983) – Recueil de données sur le réaménagement des sites miniers. Rapport BRGM 83 SGN 582 ENV, 269 p.

Cottard F., Marroncle J.L. (2001) – Evaluation environnementale du site de l'ancienne mine d'or de La Messette (Aude). Concession de Malabau. BRGM/RP-50675-FR, 160 p., 8 fig., 14 tabl. 2 ann.

Devaux P. (1980) - Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement - Laboratoire régional de Strasbourg – Utilisation des déchets miniers en terrassement. Les stériles des Mines de potasse d'Alsace – gcs. 36, faer 1.36.06.7.

Devaux P. (1983) – Les remblais expérimentaux en résidus des Mines de Potasse d'Alsace de Marie-Louise et d'Aspach-le-Bas. Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement, Laboratoire régional de Strasbourg, faer 1.36.18.0.

Devaux P. (1984) – Utilisation de déchets miniers en terrassement. Mines de potasse d'Alsace. Etude de mélange $R^2 + 6/20$. Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement, Laboratoire régional de Strasbourg, faer 1.36.06.1.

Lansart M., Sauter M. (1983) – Constat d'impact de deux anciennes exploitations minières : 2. Le cas de Cheni (Haute-Vienne). Rapport BRGM 83 SGN 721 ENV, 69 p.

Laville-Timsit L., Bonnefoy D. (1985) – Valorisation des données de l'Inventaire géochimique pour la définition de pollutions métalliques dans les Vosges, le Massif central et le Massif armoricain. Rapport 85 DAM 030.

Page : 1

[\[NCI1\] Glossaire](#)

Page : 1

[\[NCI2\] Glossaire](#)

Page : 1

[\[NCI3\] Glossaire](#)

Page : 1

[\[NCI4\] Glossaire](#)

Page : 1

[\[NCI5\] Glossaire](#)

Page : 3

[\[NCI6\] Il manque quelque chose !](#)

Page : 3

[\[NCI7\] Glossaire](#)

Page : 3

[\[NCI8\] Glossaire](#)

Page : 3

[\[NCI9\] Glossaire](#)

Page : 4

[\[NCI10\] Glossaire](#)

Page : 4

[\[NCI11\] Glossaire](#)

Page : 4

[\[NCI12\] Glossaire](#)

Page : 5

[\[NCI13\]Glossaire](#)

Page : 5

[\[NCI14\] Glossaire](#)

Page : 5

[\[NCI15\] Glossaire](#)

Page : 5

[\[NCI16\] Glossaire](#)

Page : 5

[\[NCI17\] Glossaire](#)

Page : 5

[\[NCI18\] Glossaire](#)

Page : 5

[\[NCI19\] Phrase mal coupée ? Il manque quelque chose.](#)

Page : 5

[\[NCI20\] Glossaire](#)

Page : 5

[\[NCI21\] Glossaire](#)

Page : 5

[\[NCI22\]Glossaire](#)

Page : 5

[\[NCI23\] Glossaire](#)

Page : 5

[\[NCI24\] Glossaire](#)

Page : 5

[\[NCI25\] Glossaire](#)

Page : 6

[\[NCI26\] Glossaire](#)

Page : 6

[\[NCI27\] Glossaire](#)

Page : 6

[\[NCI28\] Glossaire](#)

Page : 6

[\[NCI29\] ?](#)

Page : 6

[\[NCI30\] Glossaire](#)

Page : 6

[\[NCI31\] ?](#)

Page : 6

[\[NCI32\] Envoyer sur le site DMA du BRGM](#)

Page : 6

[\[NCI33\] Glossaire](#)

Page : 7

[\[NCI34\] Glossaire](#)

Page : 8

[\[NCI35\] Glossaire](#)

Page : 8

[\[NCI36\] Glossaire](#)

Page : 8

[\[NCI37\] Glossaire](#)

Page : 8

[\[NCI38\] Glossaire](#)

Page : 15

[\[NCI39\] Revoir la bibliographie en fonction de normes communes pour tout les dossiers.](#)

Annexe 8

Laitiers de hauts fourneaux

Avertissement:

Pour le schéma de haut-fourneau, revoir la qualité d'image, séparer gangue de détermine, corriger phrase : « Ainsi, le laitier est un verre constitué de la gangue ... » Le laitier provient de la fusion de la gangue qui correspond à la partie stérile du minerai, le fondant ayant pour rôle par réaction chimique de faciliter la fusion. Il n'y a rien de catalytique là dedans. « ...courant ascendant de dioxyde de carbone (CO₂) :

LAITIERS DE HAUTS FOURNEAUX

Résumé

Les laitiers de haut-fourneau sont des co-produits formés lors de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer. Selon le processus de refroidissement du laitier en fusion, on distingue deux familles:

- le laitier cristallisé, obtenu par un refroidissement lent qui le transforme en une roche dure artificielle et chimiquement stable ;
- le laitier vitrifié obtenu par un refroidissement brutal, généralement à l'eau, qui lui confère une structure vitreuse lui permettant de développer des propriétés analogues à celles du ciment.

Selon le décret 2002-540 du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE) relatif à la classification des déchets, les laitiers de haut-fourneau sont classés comme déchets non dangereux provenant de procédés thermiques; ils ne sont ni DIS, ni même DIB. Ils font l'objet de normes techniques de définitions, classifications et spécifications et entrent dans la composition de produits normalisés d'usage routier.

De par leurs caractéristiques physiques et mécaniques comparables à celles des matériaux naturels, les laitiers cristallisés sont utilisés en technique routière depuis la constitution de remblais jusqu'aux couches de surface des chaussées ainsi que pour les bétons. Les laitiers de fraîche production et les stocks constitués au fil des décennies, appelés crassiers, sont exploités comme des carrières de roche naturelle pour la fabrication de granulats. En raison de leurs caractéristiques physico-chimiques, les laitiers vitrifiés, le plus souvent élaborés sous forme de laitiers granulés[NCI1], trouvent un emploi privilégié dans l'industrie cimentière, mais aussi comme liants dans différents mélanges granulaires des assises de chaussées.

La longue expérience d'utilisation des laitiers de hauts fourneaux en technique routière n'a pas à ce jour révélé d'impact préjudiciable sur les eaux souterraines et le milieu naturel. La production moyenne annuelle de laitiers de haut-fourneau de fraîche production, localisée à Fos/mer; Dunkerque et Hayange, est de 1 400 000 tonnes pour le cristallisé et de 2 100 000 tonnes pour le vitrifié.

Alors que la sidérurgie tend aujourd'hui à privilégier la production de laitier vitrifié, les laitiers cristallisés de crassiers sont une alternative intéressante dans la problématique de substitution aux ressources naturelles alluvionnaires. Compte tenu du caractère limité des gisements disponibles, leur emploi doit être optimisé.

Définition

Les laitiers de haut fourneau sont des co-produits formés au cours de l'élaboration de la fonte à partir de minerai de fer. Selon la nature des minerais, on distingue trois sortes de laitiers :

- les laitiers issus de minerai de fer lorrain, riche en phosphore, (dits « laitiers Thomas T »);
- les laitiers issus de minerai de fer importé, pauvre en phosphore, (dits « laitiers hématites H »);
- les laitiers issus d'autres minerais de fer (dits laitiers « A »).

Suivant le processus de refroidissement, on distingue deux types de laitiers. Un refroidissement lent en fosse produit un laitier cristallisé, destiné à être concassé et élaboré en granulats selon la norme XP P 18 540. Un refroidissement dans l'eau produit du laitier vitrifié (granulé ou bouleté), utilisé principalement en tant que liant hydraulique selon la norme NF P 98 106.

Textes spécifiques de référence

Sommaire :

1. Projets de normes européenne
2. Normes françaises
3. Codification du déchet
4. Autres documents existants et expériences étrangères.

1. Projets de normes européenne

En ce qui concerne l'ensemble des granulats (naturels, de recyclage et de source industrielle), la norme française actuelle XP P 18-540 sera remplacée à la mi-2004 par un ensemble de normes européennes « Granulats ».

Les laitiers sidérurgiques (cristallisés de haut fourneau, d'aciérie de conversion et d'aciérie électrique) seront couverts en tant que tels par les normes européennes « Granulats » et feront l'objet, pour certains usages, de caractérisations spécifiques (la stabilité volumique des laitiers d'aciérie de conversion par exemple).

Citons en particulier, les normes européennes EN 13 043 (Granulats pour enrobés), EN 13 242 (Granulats pour MTLH), EN 12 620 (Granulats pour béton) ou encore EN 13 383 (Granulats pour enrochements).

Ci-après quelques références de normes d'essais spécifiques :

NF EN 1744 - 1 1998. Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats

NF EN 1367 - 3 2002. Essais pour déterminer les propriétés thermiques et l'altérabilité des granulats – partie 3 : Essai d'ébullition pour les basaltes coup de soleil et la désagrégation des laitiers d'aciérie.

2. Normes françaises

On se référera aux normes suivantes:

-NF P 11-300 « Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructure routière », rubrique sols matériaux rocheux et granulats naturels.

Les sous produits industriels, ainsi que les sols organiques sont classés sous la rubrique F dans cette norme. Les laitiers de haut-fourneau se retrouvent dans la classe F₈.

-Norme XP P 18 540. « Granulats Définitions, conformité, spécifications ».

Cette norme référence pour les différents domaines d'emploi des granulats dans les chaussées, bétons hydrauliques et ouvrages ferroviaires. Elle permet de classer les laitiers de haut-fourneau ainsi que tous les autres granulats, par rapport à des catégories de caractéristiques intrinsèques (résistance au choc LA, résistance à l'attrition MDE, ..) et de caractéristiques de fabrication (granulométrie, propreté,..). Elle ne prend pas en compte d'autres critères, comme par exemple celui de la stabilité volumique.

3. Codification du déchet

Selon le [décret 2002-540](#) du Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement relatif à la classification des déchets, les laitiers d'aciérie sont classés sous les numéros : 10 02 01 « Déchets des laitiers de hauts fourneaux et d'aciérie ». Les laitiers sont classés comme déchets provenant de procédés thermiques ; par contre, ils ne sont pas classés comme déchets dangereux. Ils ne sont ni DIS, ni même DIB et dans de nombreux cas ils sont aussi des produits normalisés.

4. Autres documents existants et expériences étrangères.

Les autres documents existants comme par exemple le guide pour les terrassements routier (GTR), les notes du SETRA ne font pas référence à ce type de matériau.

Origine, formation et élaboration

Sommaire :

1. Origine
2. Formation
3. Elaboration

1. Origine

Le haut-fourneau est un réacteur à lit consommable à contre-courant (SOLLAC,1975). Les deux réactions principales qui s'y déroulent sont des réactions de réduction des oxydes et d'échange entre le métal et le laitier. On introduit par le gueulard alternativement du coke, du minerai et du fondant, qui sont les matières premières utilisées pour l'élaboration de la fonte. Le lit de fusion comprend des couches alternées de coke, de minerai aggloméré et d'une faible quantité de fondant. Le coke, après combustion sous l'effet du vent chaud soufflé par les tuyères (1250°C), conduit à la fusion des matières premières introduites (appelées charges) et à la réduction du minerai. Les gaz de gueulard dépoussiérés sont utilisés pour préchauffer le « vent » dans des récupérateurs de chaleur ou *cowpers*. Les temps de séjour moyens sont d'environ 8 heures pour les solides et de 3 secondes pour les gaz.

Plus de détails : [les filières d'élaboration de la fonte schéma d'un haut-fourneau, matières premières et combustion](#)

Formé à partir des constituants du minerai, du fondant et des cendres du coke, le laitier est un silicate d'aluminium, de calcium et de magnésium. Il contient en outre des oxydes de manganèse et de fer en faible quantité, ainsi que du sulfure de calcium. Le laitier a un rôle double :

- permettre l'élimination de la *gangue* à l'aide de caractéristiques de fusibilité et de fluidité convenables,
- permettre les réactions d'échange avec le métal liquide agissant sur la composition de celui-ci.

On peut signaler que la fonte en fusion contient les éléments suivants : Fe, C, Si, Mn, P, S...et que le laitier en fusion en bas du haut-fourneau contient les éléments SiO₂, P₂O₅, MnO, CaO, Al₂O₃...

2. Formation

Aux températures atteintes, tous les constituants non métalliques et non gazeux de la charge se liquéfient : la densité du liquide ainsi obtenu (le laitier) est d'environ 3 alors que celle de la fonte est de 7. Il y a donc séparation par gravité du laitier et de la fonte : le laitier surnage à la surface du bain de fonte dans le creuset du haut-fourneau et rassemble les éléments provenant de la *gangue*, du fondant et des cendres de combustion. La séparation de la fonte et du laitier peut se faire par deux trous de coulée séparés (un trou de coulée haut permet d'assurer l'évacuation du laitier et un trou de coulée bas permet d'évacuer la fonte) ou par le même trou (un dispositif de syphonage permet leur séparation).

Les températures pratiques de coulée de la fonte, présentées dans le tableau 1, sont nécessairement élevées pour disposer d'une réserve thermique suffisante et éviter un début de solidification au cours du transport jusqu'à l'aciérie, ainsi, surtout, qu'une précipitation de paillettes de carbone.

Fer métal référence 1535°C	% C	% Si	% P	% Mn	Températures liquides de la fonte	Températures de coulées de la fonte	Températures de coulées du laitier
Fonte Thomas	3,8	0,4	1,8	0,3	1200 °C	1350°C à 1450°C	1425°C à 1525°C
Fonte hématite	4,3	0,6	0,2	0,9	1320°C	1450°C à 1500°C	1525°C à 1575°C

Tableau 1 : différentes températures de coulées de la fonte et du laitier en fonction de leur origine (Michard et Javelle, 1968).

On parle de laitiers de « fraîche production » lorsqu'ils entrent, dès leur élaboration dans la filière de valorisation par opposition aux "laitiers de crassiers" qui sont des stocks de laitier de fraîche production constitués au fil des décennies.

Le type de refroidissement du laitier peut conduire à deux formes de laitier décrites ci-après.

Laitier cristallisé : est produit à partir d'un laitier liquide à 1300°C /1500°C qui est évacué immédiatement en poche à laitier, dès la sortie du haut-fourneau vers des zones spécifiques nommées crassiers, pour y être déversé, coulée après coulée. Il s'y refroidit lentement, se transformant ainsi en roche dure artificielle. Le laitier cristallisé, chimiquement stable, est destiné à être concassé. Ses constituants sont essentiellement des silicates et des silico-aluminates de calcium. Les laitiers de haut-fourneau cristallisés permettent l'élaboration de granulats au sens de la norme XPP 18-540.

Laitier vitrifié : est brutalement refroidi à l'eau (trempe), il présente une structure vitreuse désordonnée, susceptible, sous certaines conditions, d'évoluer vers une forme cristalline stable en développant des résistances mécaniques, comme le ferait un ciment. Les laitiers de haut-fourneau vitrifiés possèdent des propriétés hydrauliques mises à profit dans les pour les cimenteries formulation des ciments ou directement dans le traitement des assises de chaussées. Il existe deux types de laitier vitrifié :

- Le laitier granulé, pour lequel le refroidissement se fait en bassin ou par jet d'eau sous pression. Sur certains sites comme à Dunkerque, c'est un autre procédé de refroidissement qui est utilisé, le système IMBA [NC12].

- Le laitier bouleté qui est soumis à deux types d'actions, un jet d'eau et une action mécanique. Le laitier liquide se déverse sur un tambour tournant cannelé qui comporte des trous en périphérie, alimentés en eau sous pression. Les particules de laitiers sont alors projetées à plusieurs mètres du tambour, ce qui permet une trempe à l'air pendant la durée du trajet des particules ; cette technique n'est appliquée qu'à Fos-sur-~~mer~~ Mer.

Le laitier moulu peut être ajouté au béton pour améliorer certaines de ses propriétés ou lui conférer des propriétés particulières comme le comportement aux milieux agressifs et à l'alcali-réaction, l'exothermicité ou la porosité. Il provient du broyage du laitier vitrifié (granulé ou bouleté).

3. Elaboration

L'élaboration des laitiers de haut-fourneau produit toute une gamme de granulats (laitiers cristallisés, figures 1 et 2) et de liants hydrauliques (laitiers vitrifiés), dont on rappelle ci-dessous les caractéristiques élémentaires telles que décrites en particulier par Alexandre et Sebilleau (CTPL , 1988).



Figure 1 : laitier cristallisé compact (Alexandre et Sebilleau, CTPL 1988).

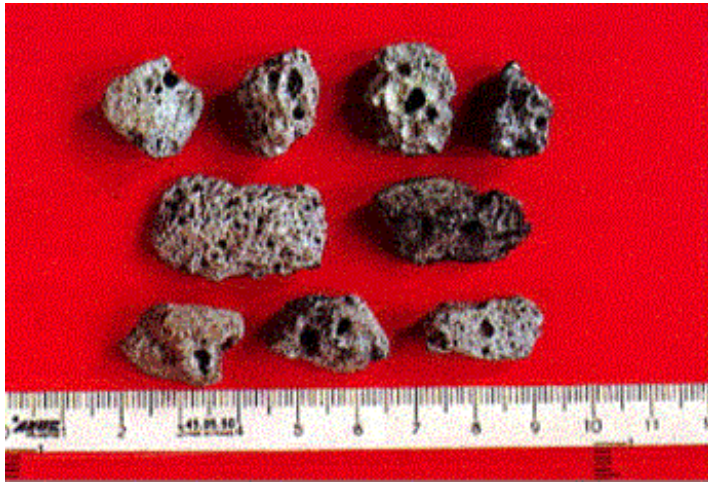


Figure 2 : laitier cristallisé poreux (Alexandre et Sebileau, CTPL 1988).

Le laitier cristallisé de haut-fourneau est élaboré selon différentes classes granulaires tout-venant, concassés 0/D et d/D selon la demande. On distingue :

- le laitier tout-venant. C'est un laitier cristallisé, de fraîche production ou non, tel que repris à l'engin. Les granulométries sont de l'ordre de 0/300 mm, sans garantie de fuseau (figure 3). Il s'agit plutôt d'un matériau de remblais ou de couche de forme.



Figure 3 : laitier cristallisé tout-venant (Alexandre et Sebileau, CTPL, 1988).

- le laitier concassé. C'est un laitier cristallisé concassé, livré en toutes granulométries (figure 4). Le laitier 0/D est dit « de compactage », lorsqu'il est criblé et calibré, mélangé ou non en proportions variables, avec du laitier granulé ou tout autre liant hydraulique. La granulométrie maximale du 0/D est de 0/50 mm ; il s'agit plutôt d'un matériau d'assises à prise lente.



Figure 4 : Installation de concassage de laitiers de [Moyeuve-Grande Moyeuve-Grande \(Société SLAG\)](#)

Le laitier vitrifié granulé correspond à un *sable* à prise hydraulique (0/5 à 0/6 mm d'après PREDIS 2001). Il peut être prébroyé, ce qui augmente sa teneur en fines autour de 10 à 12 % et ainsi sa réactivité. Il peut être activé pour développer son hydraulicité, l'activation de type calcique ou sulfato-calcique étant effectuée selon la norme NF P 98-107.

Le laitier bouleté, matériau à prise hydraulique, s'apparente en termes d'utilisation au laitier granulé ; la fraction granulométrique la plus grosse peut être utilisée comme granulat léger de laitier expansé à faible densité, notamment en construction d'ouvrages d'art. D'abord expérimenté en France par Usinor à Dunkerque, ce laitier est élaboré uniquement à Fos-sur-mer, (figure 5). Finalement, le contexte économique a fait récemment évoluer ce processus d'élaboration vers celui d'un laitier vitrifié granulé (Pérème, CTPL, 2003).



Figure 5 : laitier bouleté (Alexandre et Sebileau, CTPL, 1988).

Après refroidissement, ce laitier subit un traitement consistant :

- au scalpage des grosses parties métalliques,
- à la séparation magnétique des parties métalliques plus fines,
- au criblage à 12,2 et 40 mm de la fraction non magnétique.

Toute la partie métallique et la fraction 20/40 mm sont valorisées par SOLLAC MEDITERRANEE en interne.

Caractéristiques physico-chimiques

Sommaire :

1. Analyse chimique élémentaire
2. Caractéristiques minéralogiques
3. Stabilité volumique

1. Analyse chimique élémentaire

Le laitier contient essentiellement quatre éléments dont l'expression en oxydes représente 95 à 97 % des constituants du laitier : chaux (CaO), silice (SiO₂), alumine (Al₂O₃), magnésie (MgO). Les autres phases sont des oxydes secondaires (FeO, MnO) et des composés sulfurés. Il ne contient ni argile, ni matière organique (Schéma Départemental des Carrières, 1999). Le tableau 2 présente la composition chimique élémentaire du laitier :

Eléments	(%)
CaO	40 à 48
SiO ₂	32 à 41

Al ₂ O ₃	9 à 18
MgO	1 à 9
MnO	0,4 à 0,7
FeO	0,2 à 1
S	0,6 à 1,5

Tableau 2 : Composition chimique élémentaire du laitier de haut-fourneau (Alexandre et Sebilleau, CTPL, 1988).

Le tableau 3 représente les compositions chimiques moyennes de quelques laitiers.

	Fonte Thomas de Lorraine en %	Fonte Hématite du Nord en %
FeO	0,5-1,0	0,9
SiO ₂ (oxyde de silicium)	32-35	35
CaO (oxyde de calcium ou chaux)	41-45	36,5
MnO (oxyde de manganèse)	0,5-1,0	0,8
MgO (oxyde de magnésium)	4-6	9,5
P ₂ O ₅ (pentoxyde de phosphore)	0,1-0,5	0,05
Al ₂ O ₃ (oxyde d'aluminium)	15-17	13,5
CaO+ MgO/ SiO ₂ + Al ₂ O ₃	0,9-1,1	0,95
S (soufre)	0,5-1,0	1,0
CaO/ SiO ₂	1,2-1,4	1,05

Tableau 3 : compositions chimiques moyennes de laitiers (Michard et Javelle, 1968).

Une classification chimique est proposée par les normes P 18 302 et NF P 98 106. Elle repose sur le calcul d'un produit, le produit C.A, dans lequel C représente la teneur en CaO et A la teneur en Al₂O₃. Ce produit représente une réactivité potentielle du laitier, mais cette dernière propriété est également influencée par la teneur en fines et par le taux de vitrification du produit. Trois types de laitier sont définis selon leurs caractéristiques chimiques d'après les normes P 18302 et NF P98 106 et en fonction de la valeur du produit C.A :

- type A comme autres : C.A < 425 ;
- type H comme *hématites* : 425 \leq C.A < 550 ;
- type T comme *Thomas* : C.A \geq 550.

La quasi-totalité du laitier actuellement produit et exploité en France correspond à un laitier de type H, voire A selon la définition donnée par la norme NF P 98 106. En Lorraine, on trouve essentiellement du type T.

Le diagramme de Keil, diagramme triangulaire représentant le système ternaire chaux-silice-alumine (Figure 6), permet de situer le laitier de haut-fourneau par rapport à d'autres liants utilisés en technique routière. Ce diagramme montre que les laitiers ont une composition relativement proche de celle du clinker du ciment Portland, même si celui-ci ne nécessite qu'un apport d'eau pour déclencher son hydraulité, alors que le laitier doit être activé par un apport chimique.

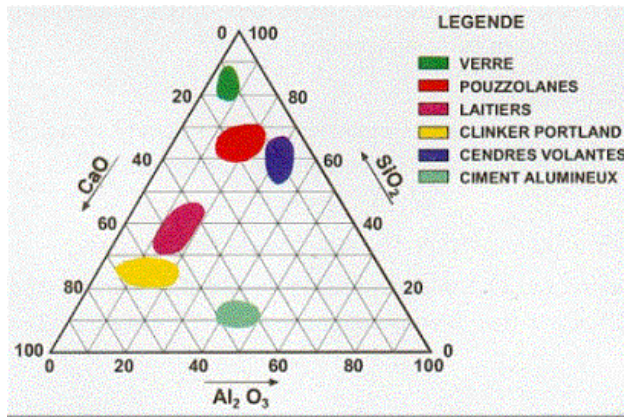


Figure 6 : diagramme de Keil.

2. Caractéristiques minéralogiques

D'un point de vue minéralogique, les constituants des laitiers de haut-fourneau sont essentiellement des silicates ou des silico-aluminates de chaux. Il s'agit d'une forme minéralogique stable.

-**Laitier cristallisé** : obtenu par refroidissement lent du laitier en fusion, le laitier cristallisé est composé de constituants cristallisés, essentiellement de silicate ou de silico-aluminate de chaux ainsi que des oxydes, des sulfures et exceptionnellement des nitrures issus essentiellement de la *gangue* et des fondants utilisés dans la matière première (minerai, fonte, acier,...). Le tableau 4 ci-dessous, présente les constituants des laitiers cristallisés.

Désignation		Composition minéralogique	Formule simplifiée
Classe des silicates			
Méililite (mélange cristallin solution solide de deux pôles minéraux) : Gehlenite Akermanite		2 CaO – Al ₂ O ₃ – SiO ₂ 2 CaO – MgO – 2 SiO ₂ Corriger tours le 0 par O	C ₂ AS C ₂ MS ₂ [NCI3]
Merwinite		3 CaO – MgO – 2 SiO ₂	C ₃ MS ₂
Silicate bicalcique (a = Bredigite) (b = Larnite) (g)		2 CaO – SiO ₂	C ₂ S
Rankinite		3 CaO - SiO ₂	C ₃ S ₂
Wollastonite	b { a	CaO - SiO ₂	CS
Forsterite		2 MgO - SiO ₂	M ₂ S
Enstatite		MgO - SiO ₂	MS
Monticellite		CaO – MgO - SiO ₂	CMS
Anorthite		CaO – Al ₂ O ₃ – 2 SiO ₂	CAS ₂
Diopside		CaO – MgO – 2 SiO ₂	CMS ₂
Leucite		(K ₂ O – Na ₂ O) Al ₂ O ₃ - 4 SiO ₂	(KN) AS ₄
Augite (silicate complexe)		(Ca – Mg – Fe – Ti – Al)	

Classe des oxydes			
Spinelles	{	MgO – Al ₂ O ₃ FeO – FeO _{2,3}	MA
Perowskite		CaO – TiO ₂	
Classe des sulfures			
Oldhamite		CaS MnS FeS	
Autres constituants possibles		Carbures – Nitrures - Thiosulfates alcalins,...	

Tableau 4 : constituants des laitiers cristallisés d'après (Alexandre et Sebileau, CTPL, 1988)
- **Laitier vitrifié** : l'analyse des phases par diffraction des rayons X (Alexandre et Sebileau, CTPL, 1988) fait apparaître, pour le laitier vitrifié, des raies de phases cristallisées (mélilite et merwinite). L'importance de la phase amorphe dépend du degré de vitrification : sur un laitier totalement vitrifié, seule la phase amorphe est représentée.

3. Stabilité volumique

Tout risque d'instabilité volumique est en principe écarté, tant pour le laitier cristallisé que pour le laitier vitrifié, car ils ne contiennent ni magnésium libre (MgO) ni calcium libre (CaO). Toutefois, dans certains cas exceptionnels (Alexandre et Sebileau, CTPL, 1988), le laitier cristallisé peut ne pas être stable. Il se désagrège alors après solidification et se transforme en une poudre grossière. Un tel laitier est dit « fusant ». Ce phénomène peut se produire pour des laitiers à forte teneur en CaO, ou à rapport CaO/SiO₂ élevé. Il est dû à la présence d'orthosilicate de calcium dont le passage de la forme β à la forme γ s'accompagne d'une augmentation de volume de 10 % environ. Cette expansion provoque une réduction du produit en poussière. L'effusement reste cependant un phénomène très exceptionnel, qui a tendance à disparaître avec la diminution de la basicité des laitiers actuels.

Les projets de normes européennes, cités au chapitre 2, imposent que « les granulats de laitier de haut-fourneau refroidis dans l'air soient exempts de désintégration du silicate bicalcique ». De plus, cette norme impose que « les granulats de laitier de haut-fourneau refroidis dans l'air soient exempts de fer instable ».

Le projet de norme EN12620 « Granulats pour béton » définit des catégories de teneur en sulfates solubles dans l'acide (AS_{1,0}, AS_{déclarée}, AS_{NR}) et limite la teneur en soufre total à 2 % pour les granulats de laitier de haut-fourneau refroidis dans l'air. Pour la réalisation d'essais, ces normes se réfèrent à la norme NF EN 1744-1 relative aux essais de lixiviation pour déterminer les propriétés chimiques des granulats.

Caractéristiques géotechniques

Sommaire :

1. Laitier cristallisé
2. Laitier vitrifié

Les laitiers de Haut-fourneau permettent l'élaboration de granulats au sens de la norme XP P 18-540 ou de liants hydrauliques au sens de la norme NF P 98106 . Les producteurs de granulats de laitier sont tenus, au même titre que les producteurs de granulats naturels, de fournir à leurs clients une fiche technique produit résumant les exigences de la norme et les caractéristiques mesurées du produit ; ceci est défini dans la norme XP P 18 540 relativement aux propriétés intrinsèques des gravillons. Des précisions concernant les propriétés mécaniques sont données ci-dessous, par type de laitier (cristallisé ou vitrifié).

1. Laitier cristallisé

Le laitier cristallisé est une roche artificielle présentant une porosité très variable, imputable essentiellement à la méthode de refroidissement. Cette variabilité de porosité aura une

influence sur les caractéristiques mécaniques ainsi que sur des particularités de comportement.

Résistance mécanique : La résistance mécanique d'un laitier cristallisé est aussi fonction de la nature des constituants minéraux, de la dimension des cristaux, de leur texture (imbrication des minéraux constitutifs liée aux conditions de refroidissement) et de leur dureté. Les résistances à la compression simple sur cubes de laitiers cristallisés sont habituellement comprises entre 130 et 180 MPa. Les modules d'élasticité varient de 70 000 à 95 000 MPa.

Valeurs Los Angeles et MDE : Les caractéristiques de résistance à l'attrition en présence d'eau (M.D.E) et au choc sont très variables d'un laitier à l'autre. En effet, parmi les laitiers de haut-fourneau, on peut trouver des laitier très durs, de catégorie routière B, voire A exceptionnellement, mais également et plus fréquemment des matériaux de caractéristiques plus faibles (catégorie D, E voire F) au sens de la norme XP P 18 540.

Pour illustrer ces propos, les caractéristiques de plusieurs laitiers sont données dans le tableau 5 ci-dessous.

Type de laitier	MDE	L.A	CPA
Thomas	8 à 14	16 à 24	0,50 à 0,54
crassier en exploitation : laitier Thomas	10	17	0,54
crassier en exploitation : laitier Thomas	11	18	0,52
Hématite fraîche production Dillingen	27 à 30	40 à 45	Non connu
Cristallisés de Dunkerque	25 à 30	34 à 44	Non connu

Tableau 5 : caractéristiques intrinsèques de différents laitiers cristallisés.

Masse volumique : La masse volumique d'un laitier cristallisé est très variable, mais en général plus élevée que celle des matériaux naturels. Les valeurs habituellement rencontrées se situent entre 2,5 t/m³ et 3 t/m³.

Propreté : On signale également une difficulté à garantir les catégories de propreté superficielle habituellement requise pour les gravillons. Des éléments fins issus du concassage sont piégés dans la porosité ouverte des grains, et ne sont pas éliminés par le criblage. Un lavage est nécessaire pour certains usages comme les enduits superficiels.[\[NCI4\]](#)

2. Laitier vitrifié

Dans la mesure où ce type de laitier est utilisé comme liant hydraulique, les caractéristiques qui contribuent à l'obtention des propriétés mécaniques requises pour l'emploi en technique routière sont la réactivité et l'hydraulicité.

Propriétés de réactivité du laitier : Le laitier granulé, du fait de sa structure vitreuse, est employé comme liant dans les matériaux traités aux liants hydrauliques (MTLH). Il correspond à un *sable* 0/5 ou 0/6,3 mm. En technique routière, il se caractérise par sa réactivité. Il peut être broyé pour augmenter sa teneur en fines et donc sa réactivité. On est alors en présence d'un laitier prébroyé de 0/2 à 0/4 mm, avec des classes de teneur en fines définies par la norme NF P 98-106. Cet essai ne s'applique que pour les laitiers granulés de fraîche production.

La réactivité caractérise la faculté d'attrition du laitier, c'est-à-dire son aptitude à produire des fines sous l'effet des différentes manutentions allant du transport du matériau en centrale jusqu'au compactage. Elle est définie par le coefficient a (XP P 98-108, 1995), produit de la surface spécifique S (en cm²/g) des fines inférieures à 0,08 mm et naturellement présentes, par la friabilité F obtenue par un broyage spécifique normalisé :

$$a = (S.F)/1000$$

Les laitiers vitrifiés sont répartis en quatre classes d'activité selon leur coefficient d'activité a (NF P 98-106, 1991) :

Classe 1 : a < 20

Classe 2 : $20 < a < 40$

Classe 3 : $40 < a < 60$

Classe 4 : $a > 60$

Le laitier est d'autant plus réactif que la classe est élevée. La réactivité influence les performances mécaniques R_t (résistance à la traction) et E_t (module en traction) de la *grave-laitier*. La quasi-totalité du laitier granulé produit et exploité en France est de classe 2, exceptionnellement de classe 1. Il correspond plutôt à un laitier de type H, voire A selon la définition donnée par la norme NF P 98 106. Du temps de l'exploitation du minerai lorrain, le laitier granulé produit était généralement de classe 3.

En Lorraine, certains laitiers granulés issus de fontes phosphoreuses et stockés en crassiers sont également exploités pour leur propriétés hydrauliques résiduelles. Ces dernières ne peuvent être évaluées que par le biais d'études de performances sur graves traitées.

Une synthèse des études de traitement des *sables* au laitier granulé et prébroyé (mélange d'un sable, de laitier vitrifié et d'un activant) a été réalisée par le L.R.O.P. (1975) Elle met notamment en lumière l'influence de l'activité du laitier sur les caractéristiques mécaniques (le remplacement d'un laitier granulé $a = 23$ par un laitier granulé $a = 44$ permet une augmentation, à un an de 50 % de la résistance à la compression et de 30 % de la résistance à la traction directe) ainsi que l'influence du pré-broyage dans l'amélioration des performances. Cette synthèse donne également les domaines d'utilisation de ces mélanges, ainsi que les précautions de mise en œuvre (par exemple : compactage au compacteur à pneus et non pas au cylindre vibrant) .

- Propriétés d'hydraulicité du laitier : ~~pour~~ Pour pouvoir développer son hydraulicité, le laitier vitrifié doit être activé par un agent basique. On peut utiliser une activation de type calcique ou de type sulfo-calcique (CaO, Ca SO₄ ?). Les teneurs en chaux sont de l'ordre de 0,5 à 1,3 %. Ces activants doivent respecter la norme NF P 98-107. L'indice hydraulique du laitier sert d'indication de l'activité hydraulique du laitier de haut-fourneau, à utiliser dans les ciments mélangés.

Caractéristiques environnementales

Sommaire :

1. Transferts vers l'eau

2. Transferts vers l'air

1. Transferts vers l'eau

La valorisation des laitiers de haut-fourneau ne fait pas pour l'instant l'objet de réglementation nationale en matière de protection de l'environnement. Cette situation découle en partie de la longue expérience concernant l'utilisation de ces laitiers en technique routière, utilisation qui ne semble pas, à ce jour, avoir révélé d'impact préjudiciable sur les eaux souterraines (PREDIS Nord-Pas-de-Calais, 2001).

Les seules données environnementales actuellement disponibles dans le cadre du présent observatoire sont celles communiquées par la Société Lorraine d'Agrégats (SLAG, 2002). Celle-ci a fait réaliser plusieurs type de tests sur des laitiers de haut-fourneau issus de ses sites de production de fonte phosphoreuse (Nilvange, Auboué, et Moyeuve), en vue d'une utilisation en remblai dans les zones humides et inondables. Suivant la classification de la directive européenne 91/689/CEE du 12 décembre 1991, ces laitiers pouvaient être qualifiés de type H14, c'est à dire « *écotoxiques* ». Les laitiers ont donc subi une série de tests de deux types : analyses chimiques (contenu total, lixiviation, percolation) et écotoxicité, dont les paramètres sont détaillés dans le tableau 6.

support	type de toxicité	espèces utilisées	réponse observée	population touchée (%)	norme
Matériau brut	chronique	Végétaux supérieurs	inhibition de la croissance aérienne	50 %	ISO 11269/2
	aiguë	Vers de terre	immobilisation	50 %	NF X 31-251
Lixiviat	aiguë	Vibrio fischeri (poisson)	immobilisation	50 %	XP T 90-320
		Daphnia magna	immobilisation	50 %	NF EN ISO 6341
	sub-chronique	Raphidocelis subcapitata (algue)	inhibition de la croissance	20 %	NF 28692
		Ceriodaphnia dubia	immobilisation	20 %	US/EPA agence de l'eau

Tableau 6 : tests d'écotoxicité réalisés (SLAG, 2002).

Ces tests d'écotoxicité consistent à mettre en présence des organismes vivants avec un support contaminé. Pour un support solide, les effets sont étudiés par contact direct entre les organismes vivants et le matériau. Pour un support liquide, les organismes sont plongés dans plusieurs solutions réalisées à différentes dilutions, à partir de la solution initiale contaminée. Le matériau, ou les solutions testées, sont considérés écotoxiques lorsqu'un pourcentage déterminé (ici 20 ou 50 %) de la population exposée, présente les symptômes recherchés (ici inhibition ou immobilisation). L'étude (SLAG, 2002) conclut sur la non écotoxicité pour les trois types de laitiers testés.

Ces résultats ne permettent pas néanmoins de construire un état de l'art complet dans ce domaine, car une source d'information unique est insuffisante pour effectuer une synthèse acceptable. Le programme européen SESAR est actuellement en cours (fin prévue en 2004), et a pour objet d'éclaircir les connaissances de nature environnementale dans le domaine des laitiers (voir paragraphe recherches en cours).

2. Transferts vers l'air

Concernant les laitiers sidérurgiques, des éléments d'informations ont été recueillis auprès d'exploitants qui procèdent au contrôle de *poussières inhalables* ou de *poussières alvéolaires*, conformément au décret n°94-784 du 2 septembre 1994, qui complète le règlement général des industries extractives (RGIE) [5] en introduisant un titre "empoussiérage" EM. Ce règlement impose de mesurer la teneur en quartz (inférieure à 1 % ou pas) et d'organiser un suivi de leur retombées.

Cependant, tout comme pour les matériaux naturels, ces mesures ne sont pas réalisées lors de la mise en œuvre.

Aspects sanitaires

Les prescriptions du titre EM « empoussiérage » du RGIE est applicable depuis le 8 septembre 1995. Les exploitants sont tenus de faire chaque année une campagne de la concentration moyenne en *poussières inhalables* et tous les deux ans deux campagnes de mesure des *poussières alvéolaires* siliceuses si la teneur en quartz est supérieure à 1%.

Utilisation dans les infrastructures routières

Sommaire :

1. Utilisation en remblai ou en couche de forme
2. Utilisation en couches d'assises
3. Utilisation en couches de surface

Les caractéristiques mécaniques minimales imposées aux granulats entrant dans la composition des produits sont définies par les normes «produit» (NF P 98-116, NF 98-129, NF 98-138...). Des guides d'application des normes permettent d'imposer des caractéristiques supérieures aux exigences minimales des normes selon les trafics, la position des couches et les produits. On signale également que le laitier de haut-fourneau est insensible à l'eau lors de sa mise en œuvre.

1. Utilisation en remblai ou en couche de forme

La norme NFP 11 300 (Exécution des terrassements) et le guide technique LCPC/SETRA (Réalisation des remblais et des couches de forme) classent les laitiers de haut-fourneau dans la catégorie des sous-produits industriels F avec le symbole F8. [6]

En remblai [7], selon leur granulométrie, les laitiers cristallisés de haut-fourneau peuvent être assimilés à des matériaux D2 ou D3. En couche de forme [8], d'après leurs caractéristiques de L.A. ($f < 45$) et de M.D.E ($f < 45$), [9] ils peuvent être classés D21 ou D31. [10] L'utilisation tout venant pour remblai, moins noble, tend à disparaître en raison de la diminution des ressources.

2. Utilisation en couches d'assises

Le laitier cristallisé et concassé est employé comme granulats (Figure 6) dans les couches d'assises de chaussées (GNT) ou en association avec des liants hydrauliques ou hydrocarbonés.



Figure 7 : mise en œuvre de *grave-laitier* en chaussée neuve. Dans le Tarn-et-Garonne : Rocade de MONTAUBAN

Plus de détails : [Exemples de type d'utilisation en assise de chaussées.](#)

§ Graves hydrauliques, graves non traitées et bétons hydrauliques/laitier concassé

Le laitier concassé est utilisé plus fréquemment comme granulat dans les *graves* traitées aux liants hydrauliques, quel que soit le liant utilisé (ciment, liant routier, cendres, laitier vitrifié) que dans les enrobés. Lorsque le liant est constitué de laitier vitrifié, le mélange est désigné sous le nom de *grave-laitier-tout-laitier* (GLTL).

Le laitier cristallisé est également utilisé sous forme de *grave* non traitée (GNT) pour les assises et plate formes, si les propriétés mécaniques sont suffisantes.

A l'époque de l'utilisation massive et peu rationnelle de laitiers de fraîche production, la technique de laitier 0/D « *clainé* » [NC11] a été couramment employée pour la réalisation d'assises de chaussées, avant l'avènement de la technique « *Grave laitier* », mais a perduré jusqu'au début des années 1990. Le principe consistait à mélanger du laitier cristallisé 0/D avec du laitier granulé, dans des proportions allant jusqu'à 30 %, et d'effectuer une humidification à la mise en œuvre. Ces laitiers *clainés* développent une prise progressive dans le temps sans activation particulière. Au compactage, le laitier granulé, ne remplissant que les vides du laitier concassé, ne diminue pas le coefficient de frottement élevé de ce matériau, ce qui assure une bonne stabilité mécanique. Sous l'effet de la circulation, le laitier granulé, qui joue le double rôle de *sable* et de liant hydraulique, assure une bonne liaison entre les granulats de laitier concassé. Il en résulte la transformation progressive de la chaussée en une dalle monolithique, résistante et homogène.

Le laitier concassé peut également être utilisé pour la fabrication de béton à usage routier.

§ Liants hydrauliques routiers /Laitier vitrifié

En technique routière, le laitier vitrifié est utilisé essentiellement comme liant pour la réalisation d'assises de chaussées sous la forme de *graves* traitées classées en G1, G2, G3 ou G4 (NF P 98 116), ou de *sables* traités classées en S0, S1, S2, S3, S4 ou S5 (NFP 98 113).

Le laitier vitrifié est utilisé le plus couramment comme liant sous forme de laitier granulé ou de laitier granulé pré-broyé. La technique de pré broyage le rend plus réactif et permet ainsi d'économiser sensiblement, à performance équivalente, la ressource.

Les laitiers vitrifiés constituent un composant important pour l'industrie cimentière, et permettent de réaliser de nombreux ciments normalisés de construction comme définis dans la norme NF P 15-101, mais on retiendra surtout qu'ils sont valorisés pour la confection de liants hydrauliques routiers conformes à la norme NF P 15-108. Les liants routiers sont couramment utilisés pour les techniques d'assises traitées aux liants hydrauliques, mais également en traitement de sols. Ils sont obtenus par mélanges et broyage de co-produits de l'industrie (dont les laitiers vitrifiés), d'activants de type chaux, sulfates, cendres volantes, voire de clinker.

Les performances des matériaux traités sont généralement voisines de celles obtenues avec des ciments normalisés pour des dosages équivalents, avec un avantage sensible pour les liants routiers quant aux délais de maniabilité, du fait d'une cinétique plus lente que celle des ciments classiques.

3. Utilisation en couches de surface

Les granulats de laitier concassé, par leur angularité, leur rugosité et selon leur propriétés mécaniques mesurées, conviennent pour la fabrication des enrobés hydrocarbonés, y compris pour la réalisation des couches de surface (couches de roulement et de liaison). En effet, les caractéristiques du laitier n'évoluent pas avec l'usure, puisqu'elles sont dues à la micro-porosité du laitier cristallisé. Dans l'Est, le laitier concassé est depuis longtemps couramment employé dans les couches de roulement.

La porosité des granulats de laitier conduit généralement le formulateur d'enrobés à majorer de 0,1 à 0,3 % la teneur en liant bitumineux, par rapport aux dosages conventionnels avec des granulats naturels peu poreux.

Certains problèmes sont communs à l'ensemble des laitiers sidérurgiques ; ils sont décrits ci-après. Un phénomène de "soupe" peut apparaître lorsqu'il y a surchauffe des granulats par vaporisation de l'eau incluse dans le granulat avant l'enrobage. Cet inconvénient peut être totalement éliminé en diminuant la température de séchage des granulats (140° au maximum). Le phénomène n'est pas préjudiciable à la tenue dans le temps de l'enrobé. Il nécessite seulement de différer le compactage après stabilisation des matériaux. Il est aussi nécessaire de majorer de 0,3 ppc la teneur en liant bitumineux, par rapport aux dosages conventionnels des enrobés avec granulats naturels, pour tenir compte de la forte densité des granulats de laitiers d'aciérie.

La dispersion de la porosité peut engendrer des écarts de la Masse Volumique Réelle (MVR) des granulats, qui conduisent à des difficultés de fixation des objectifs de densification pour les enrobés, *graves* traitées au liant hydraulique ou *graves* non traitées. Il serait nécessaire de fixer des fourchettes de densification et d'évolution tenant compte des MVR mini et maxi des constituants. Cette technique s'est particulièrement bien développée dans tous les bassins sidérurgiques de la Lorraine, essentiellement issus de haut-fourneau.

Finalement, une bonne technicité de mise en œuvre est nécessaire pour obtenir de très bons résultats .

Sources sur le territoire français

Il existe en France trois pôles de production de laitier de haut-fourneau appartenant au groupe ARCELOR. Une production plus modeste de laitiers cristallisés de haut-fourneau est à signaler également aux fonderies de Blénod lès Pont-à-Mousson. Le tableau 7 présente ci-dessous une production moyenne annuelle sur les dernières années.

production moyenne de laitiers de haut fourneau fraîche	dont cristallisé	dont vitrifié
3 810 000 tonnes/an	1 335 000 tonnes/an	2 475 000 tonnes/an

Tableau 7 : Production moyenne annuelle de laitiers de haut-fourneau 2002 (source CTPL).

Emplois répertoriés

Laitiers cristallisés

Les emplois sont innombrables, tant dans les chaussées du grand Est, que dans le Nord de la France jusqu'en région parisienne. Du remblai à la couche de surface, l'utilisation de ce matériau est très répandue. Pour illustrer ce propos, citons les chantiers de la rocade sud de Metz – RN 431 et de Koenigsmaker RN 153 qui démontrent la possibilité d'utilisation des laitiers dans toutes les couches de chaussées. En Lorraine, l'utilisation du laitier est très répandue : rares sont les routes ne contenant aucun type de laitier dans l'une ou l'autre de ses couches.

Laitier granulé

Traitement de sol

Le laitier granulé a fait l'objet d'une étude (L.R.P.C de Nancy, 1982) pour évaluer la possibilité de traitement de marne du Keuper pour la confortation de remblais.

Quelques exemples de chantiers réalisés avec du laitier dans les zones humides ou inondables (SLAG) sont donnés ci-dessous :-

~~1970~~ :- A31 Metz Thionville en 1970 (laitier de remblai).

~~1999-2000~~ :- Contournement de Koenigsmacker de 1999 à 2000 (couche de base en *grave-laitier* 0/20).

~~2000-2001~~ :- Enfouissement et colmatage de galeries de mines de Moyeuve -Grande de 2000 à 2001 (*sable* de laitier 0/4 en injection).

Recherches en cours

Programme de recherche SESAR (STEEL SLAG ROAD AND ENVIRONMENT)

Le but de ce programme de recherche est l'élaboration d'une approche rationnelle pour la définition de règles d'emploi des laitiers en construction routière, concernant les aspects

environnementaux. Il concerne un laitier de haut-fourneau cristallisé, un laitier de haut-fourneau granulé, un laitier de type LD et un laitier d'aciérie de four électrique.

Ce programme associe trois pays à travers les organismes suivants :

- LECES Environnement et Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (France),
- Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken (FEHS, Allemagne),
- ~~österreichische~~ Österreichische Forschungs- und Prüfenzentrum (ÖFPZ, Autriche).

Des essais sont réalisés parallèlement à une modélisation des transferts de polluants dans les eaux souterraines. Enfin, d'anciens sites, où des laitiers ont été utilisés, sont inspectés afin d'évaluer l'impact éventuel des laitiers sur les eaux souterraines.

Page : 1

[\[NCI1\] Granulé, bouleté, grenailier, homogénéiser pour tout les texte sur les laitiers et mettre dans un glossaire.](#)

Page : 4

[\[NCI2\] Mettre un glossaire](#)

Page : 8

[\[NCI3\] Donner les clés de l'écriture..](#)

Page : 10

[\[NCI4\] La règle d'utilisation des deux points : plusieurs phases avec un point implique une majuscule dès la première phrase. Si on met pas de majuscule on met point virgule \(phrase longue avec ou sans verbe\). Phares très courte une virgule simplement.](#)

Page: 12

[\[5\] Glossaire](#)

Page: 13

[\[6\] Glossaire](#)

Page: 13

[\[7\] Glossaire](#)

Page: 13

[\[8\] Glossaire](#)

Page : 13

[\[NCI9\] Mettre au glossaire](#)

Page: 13

[\[10\] Glossaire](#)

Page : 14

[\[NCI11\] Mettre au gloissaire](#)

Annexe 9

Laitiers de non ferreux

Avertissement :

Fiche procédure de lixiviation enlever (remplace la XP 31-210).

Laitier de non ferreux

Résumé

Les laitiers ou scories des métaux non-ferreux sont les résidus du Procédé Thermique relatif à l'élaboration des métaux non-ferreux. Cette rubrique traite le cas des scories issues de l'élaboration du plomb (LBF) et du zinc (ISF) car, produites en quantité suffisante, elles ont fait l'objet d'études de valorisation. D 'après le décret du 18 avril Ges-2002 ces déchets sont classés « déchets dangereux » d 'après le décret du 18 avril 2002.

Le plus fréquemment refroidies à l'eau, donc granulées, ces scories se présentent sous la forme d'un sable 0/3 mm. Elles sont essentiellement constituées d'une matrice vitreuse et ne présentent aucun caractère hydraulique. Leur composition minéralogique les rend réactives. Les résultats des essais de lixiviation réalisés (1999) suivant la norme NF X 31-210 sur les scories brutes rendent compte d'un relargage important de métaux lourds. Des expérimentations (plots instrumentés) réalisées en 2000 sur des scories traitées aux liants hydrauliques ne sont pas concluantes sur la réduction du relargage par rapport aux scories brutes. Pour le plomb, le traitement a augmenté les teneurs relarguées, tandis que pour le zinc le traitement les a réduites. L'explication scientifique de ce dernier résultat reste encore à vérifier.

Aucun exemple d'utilisation des scories de métaux non ferreux n'est connu en France. Les connaissances sur leur potentiel relargable de métaux lourds restent encore à étayer. De plus, les programmes de recherches à ce sujet sont suspendus en raison de la fermeture de l'unique site de production à Noyelles-Godault (62).

Définition

Les laitiers et scories sont les résidus de l'industrie métallurgique. Les laitiers issus de la métallurgie du fer font l'objet de deux autres rubriques spécifiques de l'Observatoire : les laitiers d'aciérie, et les laitiers de Haut-Fourneau. Seuls sont traités ici les cas des scories de zinc et de plomb de 1^{ère} fusion, car leur production a été suffisamment importante jusqu'en 2002 (année de fermeture du principal site de production à Noyelles-Noyelles-Godault (62)) pour avoir fait l'objet de plusieurs études de valorisation. En effet, l'industrie française de l'élaboration des métaux non-ferreux tels que l'aluminium, l'étain, le cuivre, le manganèse, le nickel, ainsi que l'argent, l'or ou le platine produit des scories en faible quantité qui n'ont pas fait l'objet d'études de valorisation. Elles ne seront donc pas abordées dans cette rubrique.

Textes spécifiques de référence

Sommaire :

1 Textes

2 Normes françaises et européennes

1 Textes

Les scories provenant des procédés thermiques sont, pour la plupart, classées en **Déchets Dangereux** suivant le décret 2002-540 du 18 avril 2002 du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (MATE) aujourd'hui MEDD (Ministère de l'Écologie et du Développement Durable). Le tableau 1 reprend le classement des différentes scories.

10 03

Déchets provenant de la pyrométallurgie de l'aluminium

10 03 04(*)	Scories provenant de la production primaire de l'aluminium
10 03 08(*)	Scories salées de production secondaire
10 04	Déchets provenant de la pyrométallurgie du plomb
10 04 01(*)	Scories provenant de la production primaire et secondaire
10 05	Déchets provenant de la pyrométallurgie du zinc
10 05 01	Scories provenant de la production primaire et secondaire
10 06	Déchets provenant de la pyrométallurgie du cuivre
10 06 01	Scories provenant de la production primaire et secondaire
10 07	Déchets provenant de la pyrométallurgie de l'argent, de l'or et du platine
10 07 01	Scories provenant de la production primaire et secondaire
10 08	Déchets provenant de la pyrométallurgie d'autres métaux non ferreux
10 08 08(*)	Scories salées provenant de la production primaire et secondaire
10 08 09	Autres scories
10 10	Déchets de fonderie de métaux non ferreux
10 10 03	Laitiers de four de fonderie

Tableau 1 : Laitiers et scories issus de la métallurgie des métaux non ferreux.

(*) déchets dangereux

Les scories issues de la métallurgie de l'aluminium, du plomb et les scories dites salées sont considérées comme dangereuses, en raison de la présence et de la lixiviation potentielle de métaux lourds.

2 Normes françaises

Il n'existe pas de normes propres à l'utilisation des scories issues de l'élaboration de métaux non-ferreux, les principales normes auxquelles se référer sont précisées ci-après.

-XP P 18-545 de février 2004 : [\[NCH\]](#) en ce qui concerne l'ensemble des granulats (naturels, de recyclage et de source industrielle - comme les laitiers d'aciérie -), la norme française XP P 18-540 d'octobre 1997 est remplacée par un ensemble de normes européennes « Granulats », alliées à une nouvelle norme française : XP P 18-545 de février 2004. Ces normes classent les granulats pour les différents domaines d'emploi par rapport aux caractéristiques intrinsèques (résistance au choc Los Angeles, résistance à l'attrition Micro-Deval, ..) et aux caractéristiques de fabrication (granulométrie, propreté,..). Elles ne prennent toutefois pas en compte les éventuels relargages de métaux lourds.

- NF P 11-300 de septembre 1992 : « Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructure routière ». Les scories de la métallurgie des métaux non ferreux sont classées comme les laitiers d'aciéries sous la catégorie F₉, c'est à dire « autres sous-produits industriels », sans aucune indication concernant les paramètres limitatifs à leur utilisation.

D'autres normes sont citées dans cette rubrique : il s'agit de normes concernant les essais de lixiviation telle que la XP X 31 210 de mars 1992 remplacée depuis par la EN 12457-2 de décembre 2002 et de la XP X 31 211 d'avril 2000.

Plus de détails sur [les procédures françaises de lixiviation](#).

L'utilisation des scories issues de l'élaboration du plomb et du zinc devra faire l'objet d'une étude préalable pour vérifier les caractéristiques environnementales, géotechniques et mécaniques des matériaux considérés.

Origine, formation et élaboration

Sommaire :

1 Origine et formation des scories de zinc et de plomb.

2 Elaboration des scories de zinc et de plomb.

1 Origine et formation des scories de zinc et de plomb

L'élaboration des métaux ferreux ou non-ferreux s'accompagne de la production de laitiers ou de scories. Ces sous-produits contiennent les impuretés des matières premières (minerai ou

déchets) qui sont séparées du métal avec l'ajout d'adjuvants d'origine chimique pour la désulfuration, la déphosphoration ... Ces impuretés se retrouvent généralement dans les scories sous forme de silicates, de métaux réduits, d'oxydes et de sulfures divers.

Les scories de zinc ou de plomb sont produites lors de l'élaboration du métal de première fusion (issu du minerai de zinc/plomb) ou de seconde fusion. Ce dernier procédé traite essentiellement les poussières sidérurgiques provenant du traitement des ferrailles en fours électriques.

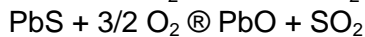
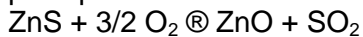
Le minerai mixte de zinc/plomb est essentiellement constitué de sulfure de zinc, la blende (ZnS) et de sulfure de plomb, la galène (PbS). Ces deux sulfures sont répartis dans une gangue dont les éléments principaux sont le fer et la silice. La gangue contient également d'autres métaux en faibles quantités, qui sont récupérés lors du processus de traitement (argent, cuivre, cadmium, antimoine, bismuth, indium).

Les métallurgies du zinc et du plomb sont basées sur deux étapes fondamentales qui sont le *grillage* des sulfures, et la réduction de l'oxyde obtenu en métal. Le zinc ou le plomb brut obtenu subissent alors une opération d'affinage [Althabetgoity et al., 1982], [Darcy, 1988], [Blazy et al., 1998], [Rizet, 2000].

1- L'étape de **grillage des sulfures** se réalise selon le procédé **Dwight-Lloyd** à une température d'environ 900°C. La charge est constituée de :

- minerai de ZnS et PbS (le rapport Zinc/Plomb allant de 0,3 à 0,9),
- repasse (concentré déjà grillé),
- *fondant*.

Le produit final de l'oxydation est constitué d'oxyde de zinc et d'oxyde de plomb. Les réactions principales sont :



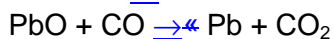
Le soufre qui se dégage sous forme gazeuse est récupéré au niveau des caissons par un système de ventilation. Il est destiné à être transformé en acide sulfurique. Des produits tels que du calcaire, des scories *grenillées* (granulées) [\[NC12\]](#) sont ajoutés à l'alimentation pour diluer le composé sulfuré afin d'atténuer les effets de l'exothermicité de l'oxydation qui pourraient aboutir à une fusion trop précoce du minerai.

Plus de détails sur [la Grille Dwight-Lloyd](#)

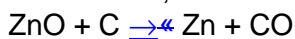
2- L'étape de réduction se fait selon le procédé thermique de réduction « **Imperial Smelting** ».

Ce procédé est adapté au minerai mixte à zinc dominant. Il s'agit d'un Haut-Fourneau alimenté par l'oxyde de zinc (et de plomb dans une moindre mesure) encore chaud (180°C) et de coke préchauffé à 500-600°C, servant de combustible et de réducteur. De l'air chauffé à environ 950°C est soufflé à la base du Haut-Fourneau : les gaz et les charges circulent alors à contre-courant. La température maximale au sommet du creuset est de l'ordre de 1100°C et les réactions qui se produisent sont la réduction des oxydes de zinc et de plomb ainsi que la formation du laitier.

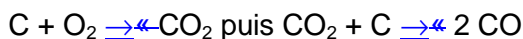
Pour le plomb,



Pour le zinc,



Dans les deux cas les réactions sont favorisées par les réactions parallèles suivantes :



Le zinc, à l'état de vapeur, est entraîné vers le haut par les gaz où il est condensé par adsorption dans les condensateurs par une pluie de fines gouttelettes de plomb à 550°C. Le liquide plomb-zinc, refroidi à 450 °C, forme deux couches qui se séparent naturellement par densité :

- une couche lourde de plomb contenant 2,2 % de zinc (ce plomb zingueux est renvoyé vers la condensation),

- une couche de zinc plus légère contenant 1,5 % de plomb qui, après refroidissement donne le zinc.

Le zinc et le plomb brut obtenus sont alors affinés par *distillations fractionnées* faisant monter leur richesse à près de 100 %. Le laitier, formé principalement par la gangue et les cendres de coke et contenant quelques pour-cent de zinc et de plomb, s'écoule vers le bas à une température voisine de 1250°C. Refroidi et grenailé par un courant d'eau sous pression il constitue les **scories de zinc appelé scories ISF (= Imperial Smelting Furnace)**.

Plus de détails sur [l'installation « Imperial Smelting »](#)

La réduction de l'oxyde de plomb peut également se réaliser de façon exclusive dans un four à cuve verticale : le **Water-Jacket**, comme c'était le cas à l'usine de Noyelles-Godault (62) du groupe Metaleurop ~~avant sa fermeture (inutile dit avant)~~. Il est constitué de plusieurs parties : le creuset d'où est extrait le plomb, la cuve où la fusion s'opère et le gueulard, zone d'alimentation et d'évacuation des gaz. Le plomb, soutiré à la base du four, est appelé plomb d'œuvre et doit encore subir une opération d'affinage pour augmenter sa pureté ; sur celui-ci surnage les **scories de plomb appelée scories LBF (= Lead Blast Furnace)**.

Plus de détails sur [le four Water-Jacket à plomb](#)

2 Elaboration des scories de zinc et de plomb

Les scories de zinc et de plomb encore riches peuvent être réenfournées directement afin de récupérer le métal résiduel. La température moyenne à laquelle les scories sortent du four est de 1250 °C. Elles sont généralement refroidies sous eau par trempe, ce qui leur confère un caractère vitreux (généralement associé à un certain potentiel réactif).

Après ce refroidissement, *les scories se présentent sous la forme d'un sable 0/3 mm environ, de masse volumique élevée (3.6 t/m3).*

Caractéristiques physico-chimiques

Sommaire :

1 Composition chimique

2 Composition minéralogique

La plupart des scories et laitiers sont des silicates fondus avec des aluminates, phosphates, plombates... Leur composition est fonction du procédé de traitement du minerai employé et de la nature de ce minerai.

1 Composition chimique

Les éléments chimiques contenus dans les scories sont présentés ici (Tableau 2).

Eléments chimiques	ISF (zinc) Teneur en %	LBF (plomb)
Fe	21,99	23,73
Si	11,02	11,60
Ca	10,82	12,69
Zn	7,20	9,40
Al	5,52	1,49
S	1,90	0,37
Pb	0,82	2,81
Mg	0,80	1,20
K	0,55	0,28
Cu	0,26	0,12
Ba	0,20	0,55
Ti	0,25	0,10
P	0,17	<0,1
Cr	0,16	0,10
As	0,10	0,10
Sn	<0,10	0,13

Tableau 2: Composition chimique des scories (ISF) et (LBF) obtenue par analyses semi-quantitatives par fluorescence X donnée issue de [De Brandere, 2002].

Aucune autre donnée n'a pu être récoltée à ce jour. On note que la quantité de zinc est plus importante dans les scories LBF que dans les scories ISF.

2 Composition minéralogique

Les éléments Fe, Si, Ca et Al se présentent majoritairement sous la forme d'oxydes (FeO, SiO₂, CaO, et Al₂O₃).

Dans un rapport réalisé par le BRGM [Piantone et Bodenan, 2001] pour le compte du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, les auteurs soulignent que des ajouts minéraux lors de l'élaboration du métal (fréquents pour rectifier la viscosité du laitier ou pour faciliter l'affinage du métal élaboré) ont une incidence importante sur la composition minéralogique des scories. En fonction du type d'ajout, la composition des scories pourrait induire soit des pH fortement basiques (pH >7) soit au contraire extrêmement acides (pH <7) lors de la lixiviation.

Les scories ISF (plomb) et LBF (zinc) issues de l'usine de Noyelles-Godault de Metaleurop sont constituées d'une matrice vitreuse à 95 % de leur poids (le refroidissement des scories de plomb et de zinc se réalisant par courant d'eau sous pression). Par microsonde électronique, des informations sur la composition minéralogique des scories ISF et LBF sont données par Gervais [Gervais, 1999], Nan Hammade [Nan Hammade, 2000], et Mandin [Mandin, 1999], Piantone et Bodenan [2001] et Deneele [2002].

- Les **scories ISF (zinc)** sont constituées principalement par une phase silicatée amorphe (aluminosilicate de Fe, Ca, Zn). Des oxydes métalliques sont également présents en plus faible proportion ainsi que du plomb sous la forme métallique. Le zinc est porté à 90 % en poids par la phase alumino-silicatée. Le plomb est à 80 % en poids sous forme de sphérolithes (billes) de plomb métal. *Ces billes, d'un diamètre moyen de 100 µm, sont parfois en périphérie des grains de scories et donc susceptibles d'être plus facilement lixiviées [Gervais, 1999] et [Nan Hammade, 2000].*
- Les **scories LBF (plomb)** sont également constituées principalement par une phase silicatée amorphe (aluminosilicate de Fe, Ca, Zn, Pb). On y retrouve également du plomb sous la forme métallique. Ainsi, 77 % du plomb et 88 % du zinc (rapport massique) sont portés par la phase silicatée et 23 % en poids du plomb est sous forme de sphérolithes de métal d'un diamètre moyen de 20 µm. *Ces billes n'ont pas été observées à la périphérie des grains des scories de plomb par Gervais [Gervais, 1999] et Nan Hammade [Nan Hammade, 2000]. Mais cette absence n'est pas confirmée par les travaux du BRGM [Piantone et Bodenan F., 2001].*

A partir de ces données minéralogiques certains auteurs [Gervais, 1999], [Nan Hammade, 2000], estiment que le plomb contenu dans les scories ISF est plus facilement relargable que celui contenu dans les scories LBF. Pour d'autres [Piantone et Bodenan F., 2001], les deux type de scories auraient un potentiel relargable de relargage similaire.

Caractéristiques géotechniques

Sommaire :

- 1 Granulométrie
- 2 Caractéristiques physico-mécaniques
- 3 Stabilité dimensionnelle (risques de gonflements)

1 Granulométrie

Les scories de plomb (LBF) (figure 1) et de zinc (ISF) (figure 2) présentent des distributions granulométriques comparables [De Brandère, 2002] correspondant à un sable fin 0/3 mm, plutôt homogène et exempt de fines de dimension < 80 µm .

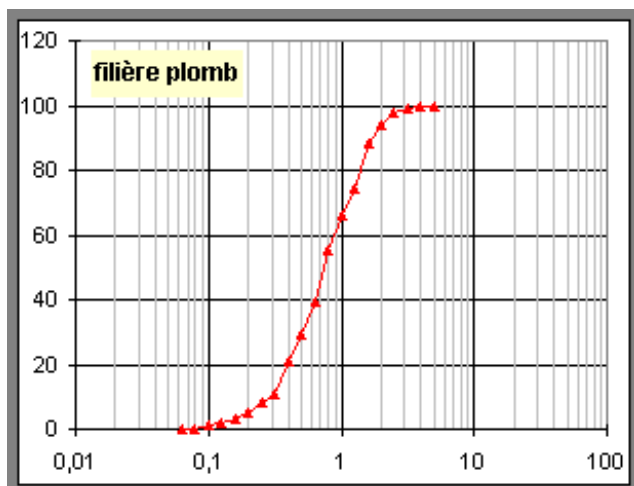


Figure 1 : Granulométrie des scories LBF

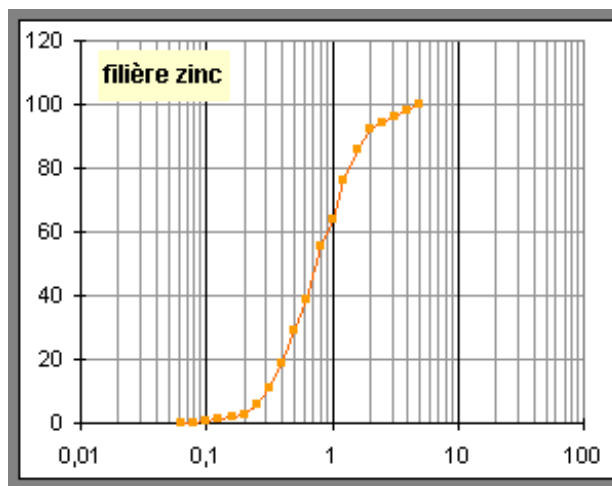


Figure 2 : Granulométrie des scories ISF

2 Caractéristiques physico-mécaniques

Les masses volumiques sont nettement plus élevées (Tableau 3) que celles des matériaux naturels courants. Selon la norme NFP 11-300, ces scories sont classées dans la famille F9. Au regard de leur granulométrie et de leur friabilité (correspondant à un matériau très dur), ces scories pourraient être assimilables à un sol de catégorie D11, réputé insensible à l'eau, car elles sont exemptes de fines.

	Masse volumique absolue	Valeur du coefficient de friabilité des sables des scories
Scories ISF	3,60 t/m ³	17
Scories LBF	3,80 t/m ³	18

Tableau 3 : Caractéristiques physiques de scories ISF et LBF
[De Brandère, 2002]

3 Stabilité dimensionnelle (risques de gonflements)

Des tests prédictifs de gonflement propres aux laitiers (Test « à la vapeur » et Test « au bain marie ») n'ont révélé aucun phénomène de gonflement [De Brandère, 2002]. Ce résultat demanderait toutefois à être vérifié par d'autres essais sous d'autres conditions.

Caractéristiques environnementales

Sommaire :

1 Essais de lixiviation en laboratoire

2 Essais de lixiviation in-situ

Les vecteurs de transports des substances chimiques contenues dans les matériaux peuvent être l'air et l'eau. Le transport aérien des substances concerne surtout les émissions de poussières pendant les étapes d'élaboration et de démolition. Cependant, dans un usage normal d'utilisation (matériau mis en place), le vecteur principal des substances étant l'eau, l'essentiel des données disponibles sur ces produits est lié à l'eau.

1 Essais de lixiviation en laboratoire

Les quantités lixiviables des scories ont été déterminées en mettant en oeuvre l'essai de la norme **XP X 31-210 de mars 1992** (remplacé aujourd'hui par celui de la norme **EN 12457-2 de décembre 2002**) par Nan Hammade [Nan Hammade, 2000] (tableau 4).

	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄	CN	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Pb	Zn
Scories LBF	<30	<100	0,95	<0,09	<0,15	<0,12	0,21	11,7	11,8	5,1	0,62	29,5	<0,09	8,42	28,2
Scories ISF	<30	<100	1,6	<0,09	<0,15	<0,12	0,26	18,1	30,2	2,6	0,59	41,6	<0,09	2,88	35,7

Tableau 4 : Masse lixiviable (XP X 31-210) des scories brutes en mg/kg

Le mélange obtenu à base de scories (80 % de scories ISF ou LBF) de cendres volantes (15 % de cendre volante) et de ciment (5 % de ciment CEM II 32,5) est soumis au test de lixiviation sur carotte (**norme XPX 31-211 d'avril 2000**). Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 5 [Nan Hammade V., 2000].

	Pb		Zn	
	Après 7 jours	Après 90 jours	Après 7 jours	Après 90 jours
Scories LBF	6,86	0,09	1,05	0,28
Scories ISF	0,63	0,24	0,71	0,009

Tableau 5 : Masse lixiviable (XP X 31-211) des scories traitées en mg/kg

Le traitement des scories par un mélange de cendres volantes et de ciment réduit sensiblement le potentiel relargable (teneurs en plomb et zinc inférieures à 1 mg/kg après traitement à 90 jours). Toutefois, les modes opératoires des tests réalisés sur échantillons bruts et traités sont différents. L'un est réalisé sur matériau granulaire (D<4 mm)(norme XP X 31-210), l'autre sur éprouvette massive (norme XPX 31-211). Cette différence représente un obstacle à la conclusion qui pourrait être tirée de ces résultats. De plus, le caractère dangereux d'un déchet ne dépend pas uniquement de son contenu en substances chimiques polluantes. Pour une même teneur, la disponibilité des substances chimiques varie en fonction de paramètres intrinsèques au déchet et des conditions imposées par le milieu extérieur.

Plus de détails sur [le comportement des scories en milieu acide ou basique](#)

2. Essais de relargage in-situ

2.1 Réalisation de plots expérimentaux

Un site expérimental (LRPC de Lille) comportant trois « plots » exposés aux conditions climatiques a été réalisé dans le cadre de la thèse de Nan Hammade [Nan Hammade, 2000]. Le suivi a été réalisé sur une durée de 10 mois. L'essai correspond à une percolation d'eau au travers des déchets granulaires riches en métaux et placés en dépôt. Il s'agit d'un scénario fictif qui ne traduit donc pas nécessairement les conditions dans lesquelles les déchets concernés pourraient être utilisés.

Le bac B1, témoin, est composé de sable naturel, le bac B2 est composé d'un mélange de scories ISF et LBF mélangées et non traitées, et le bac B3 constitué d'un mélange de scories traitées et solidifiées (sable-ciment de composition 5 % de ciment CEM II 32,5, 15 % de cendre volante et 80 % de scories). Les figures 8 et 9 donnent un aperçu de l'installation.

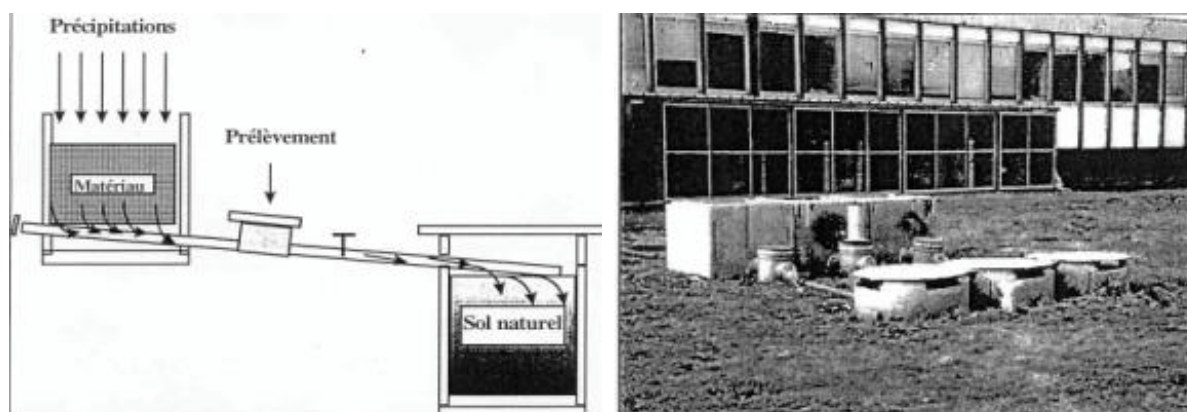


Figure 8 et 9 : Plots expérimentaux des scories ISF et LBF brut et traitées

Les figures 10 et 11 présentent respectivement les concentrations en plomb et en zinc des eaux de percolation prélevées dans les regards des bacs n°1, 2 et 3 et des eaux de pluies.

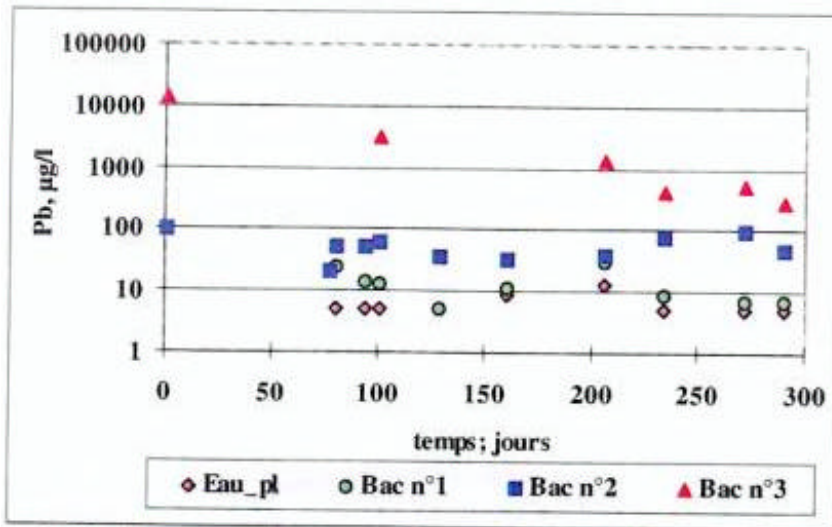


Figure 10 : Teneur en plomb des eaux de percolation et de pluie

Le relargage en plomb des scories du bac n°2 (dont le pH compris entre 7,5 et 8,5) reste relativement constant jusqu'à la fin du suivi : les concentrations en plomb varient entre 40 et 90 µg/l durant toute la période de l'expérimentation. Celui des scories du bac n°3 (pH variant entre 11,6 et 12,7) par contre, passe de 13,9 mg/l à 277 µg/l en fin de suivi, valeur qui demeure relativement importante. *La technique de solidification mise en œuvre ne permet donc pas de réduire le relargage en plomb. Celui-ci s'avère plus important dans un milieu basique (pH>7) que dans un milieu neutre (pH=7).*

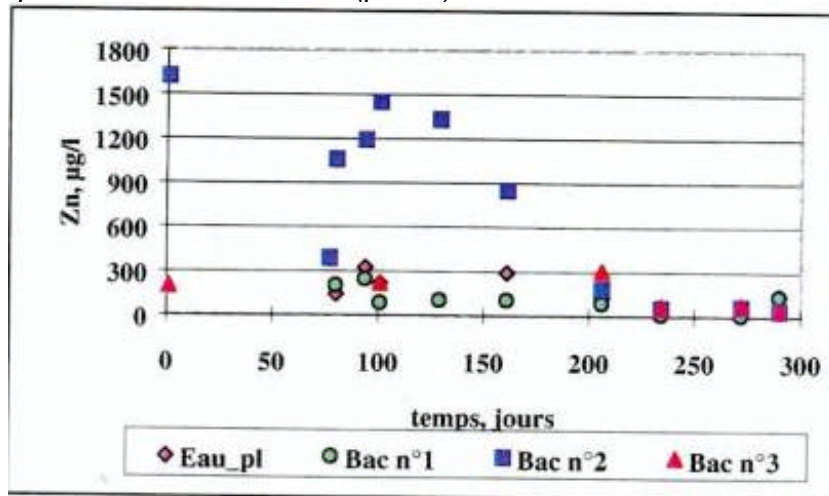


Figure 11 : Teneur en zinc des eaux de percolation et de pluie

Le relargage du zinc par les scories traitées (Bac n°3) est nettement inférieur à celui des scories brutes (bac n°2) [Gervais, 1999]. Selon Gervais, l'inhibition du relargage du zinc pourrait être liée à la carbonatation (qui induit une forte augmentation du pH) du mélange scories-ciment-cendres volantes.

Ces résultats montrent l'importance de la prise en compte du contexte physico-chimique (et notamment en terme de pH) dans la détermination de la solubilisation des métaux.

2.2 Réalisation d'aires de stationnement

Une étude expérimentale menée par Metaleurop Recherche, Polden Insavalor et le groupe de Travaux Publics Colas [Mandin, 1999] a consisté à réaliser quatre aires de stationnement de dimensions 7,2 m par 22 m. Des scories ISF ont été utilisées à la fois dans une formule de sable-ciment et de sable-bitume pour la couche de base en substitution partielle du sable (50 %). D'après l'auteur, la formulation favorisant le plus faible relargage des éléments Pb et Zn

consiste à intégrer les scories dans un sable-bitume. Mais, ce type de produit étant peu utilisé en technique routière, il reste à reproduire cette expérience avec d'autres types de matériaux et d'autres formulations.

Aspects sanitaires

Aucune donnée relative aux risques sanitaires liée à la valorisation des scories de métaux non-ferreux n'est disponible en l'état actuel des connaissances scientifiques et techniques.

Utilisation dans les infrastructures routières

D'une manière générale, toute utilisation de scories issues de procédés thermiques (DIS) doit faire l'objet d'une autorisation de mise en œuvre par le préfet du département producteur de ces scories.

A l'heure actuelle, il n'existe pas de réglementation codifiant les usages en matière de recyclage et de valorisation des résidus des procédés thermiques. *Dans ces conditions, avant d'envisager une quelconque utilisation, il est vivement recommandé de procéder à une étude complète qui permette de quantifier le relargage des substances chimiques et de se prémunir vis à vis de tout risque environnemental et sanitaire.*

Sources sur le territoire français

En Europe de l'Ouest (France, Benelux, Grande-Bretagne, Allemagne, Espagne, Italie) la métallurgie du plomb et du zinc produit respectivement 700 000 et 300 000 tonnes de scories (tableau 6). Environ 800 kg de scories sont produites pour une tonne de métal. La société française productrice de zinc et de plomb était la société Metaleurop. Depuis 2002, elle a définitivement cessé toute production. Des terrils de scories subsistent (dépôt de 2 à 6 mètres sur plus de 30 hectares) sur le site de production qui fait aujourd'hui l'objet d'une mise en conformité.

SOCIETE	ETABLISSEMENT	PRODUCTION ANNUELLE
Metaleurop (fermée)	Noyelles-Godault (62)	65 000 t de zinc
Metaleurop (fermée)	Noyelles-Godault (62)	105 000 t de plomb

Tableau 6 : Sociétés productrices et capacité de production de scories de **zinc et du plomb**

Emplois répertoriés

En France, aucun emploi des scories de plomb et de zinc n'est répertorié à ce jour.

Recherches en cours

A l'heure actuelle, il n'existe aucune recherche en cours visant à la valorisation des scories de zinc ou de plomb.

Bibliographie

Sommaire :

1.Publications

2.Normes

1.Publications[\[NCI4\]](#)

Althabegoïty G., Godfroi J. (1982), *Métallurgie du plomb*, Techniques de l'Ingénieur

BISHOP P.L. (1988) Leaching of inorganic hazardous constituents from stabilized/solidified hazardous waste. *Hazardous Waste and Hazardous Materials*, , Vol 5, N°2, pp129-143

Blazy P., Jdid E. (1997), *Introduction à la métallurgie extractive*, Techniques de l'Ingénieur

Blazy P., Jdid E. (1998), *Métallurgie extractive _ Pyrométallurgie*, Techniques de l'Ingénieur

Darcy M. (1988), *Métallurgie du zinc*, Techniques de l'Ingénieur

De BRANDERE G. (2002), PREDIS Nord Pas de Calais

Fédération des Minerais et Métaux (2001), *L'industrie des minerais, Minéraux industriels et Métaux non ferreux, chiffres-clés 2000*

[Deneele, D. \(2002\) .Caractérisation, simulations expérimentales et thermodynamiques de l'altération de déchets vitreux: Les scories de première fusion de plomb et de zinc. Thèse université de Lille.](#)

Gervais C. (1999), *Evaluation environnementale des perspectives de valorisation en BTP de scories de première fusion de plomb et de zinc*, thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon

MANDIN D. (1999), "Which application for lead and zinc primary smelter slag ?" *Metaleurop Recherche*. Congrès « Stabilisation des déchets & environnement », 13 – 16 avril 1999, Lyon Villeurbanne.

Nan Hammade V. (2000), *Caractérisation et valorisation des déchets et sous-produits industriels dans le domaine du génie civil et en technique routière*, thèse, Université des Sciences et Technologie de Lille

PIANTONE P. et BODENAN F. (2001), *Résidus des procédés thermiques (RPT) : apport de la minéralogie dans l'optimisation de la démarche et la prédiction de leur évolution*.

Rizet L., Charpentier P-E. (2000), *Métallurgie extractive _ Hydrométallurgie*, Techniques de l'Ingénieur

Société de l'Industrie Minérale (1998), *Mémento des Mines et des Carrière, Aide-mémoire de l'exploitant, nouvelle série N°4*

Société ERAMET (1996), *Métallurgie du nickel*, Techniques de l'Ingénieur

Voisin P. (1992), *Métallurgie extractive de l'aluminium*, Techniques de l'Ingénieur

2.Normes

NF P 11 300, septembre 1992. Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières, AFNOR (Ed), Paris, France, Norme française, 21 p.

XP P 18 545, février 2004. Granulats. Eléments de définition, conformité et codification » ; norme interprétative des nouvelles normes européennes.

NF EN 13 043, août 2003. Granulats pour mélanges hydrocarbonés et pour enduits superficiels utilisés dans la construction des chaussées, aérodromes et autres zones de circulation.

NF EN 13 242, août 2003. Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction de chaussées.

XP X 31-210, mars 1992. Essai de lixiviation.

XP ENV 12457-2, décembre 2002 (remplace la XP 31- 210). Lixiviation. Essais de conformité pour lixiviation des déchets fragmentées et des boues.

XP X 31 211, avril 2000. Essai de lixiviation d'un déchet solide initialement massif ou généré par un procédé de solidification.

NF EN ISO 11 885, 1998. Qualité de l'eau. Dosage de 33 éléments par spectroscopie d'émission atomique avec plasma couplé par induction, AFNOR (Ed), Paris, France, Norme française, 18 p.

Page : 2

[\[NC11\] Respecter la règle des deux point déjà donnée et en plus on à pas le droit de mettre deux points après deux points.](#)

Page : 3

[\[NC12\] Mettre au glossaire](#)

Page: 5

[\[3\] Que voulez vous dire par cette phrase sibylline ?](#)

Page : 10

[\[NC14\] Homogénéiser la bibliographie](#)

Annexe 10

MIOM

Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères

Résumé

Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) sont les résidus solides issus de la combustion de la fraction non triée des ordures ménagères collectée par le service public, plus ou moins mélangée à des déchets d'entreprises (artisans, commerçants) et administrations. Leur caractère utilisable en travaux publics est précisé dans une circulaire du ministère de l'Environnement, datant de 1994. Ils font l'objet de guides régionaux, dont celui d'Ile de France, édité en 1998.

Les MIOM, en sortie des usines d'incinération, sont généralement dirigés vers des installations de maturation et d'élaboration (IME), dans lesquelles ils subissent différentes opérations visant à les débarrasser de certains éléments grossiers et/ou métalliques, et à améliorer leur homogénéité et leur stabilité. D'un point de vue physique, les MIOM élaborés sont constitués d'une phase scoriacée (légère) et d'une phase vitreuse, la partie grossière correspondant notamment aux débris de verre. Sur le plan chimique, on trouve dans les MIOM des éléments chimiques majeurs (Si, Ca, Na, K, Al...) en proportion voisine de celle des roches magmatiques et de très nombreux éléments traces métalliques (Pb, Zn, Cu, Mo, V, Cd...) reconcentrés par la perte de masse induite par la combustion. près de la moitié de la classification de Mendeleiev. La surveillance porte principalement sur la quantité d'imbrûlés (résultat de la qualité d'incinération) et sur les métaux lourds, dont on doit vérifier la faible solubilité pour déclarer le matériau valorisable. Dans ce cas, on a affaire à des graves 0/20 mm ou 0/31,5 mm, se caractérisant par des résistances mécaniques modérées et une teneur en eau à l'optimum Proctor de 10 à 20%.

Environ trois millions de tonnes de MIOM sont produits annuellement en France, les régions les plus riches en MIOM étant l'Ile de France et Rhône-Alpes. Les MIOM sont utilisés en France en remblai, couche de forme ou couche de fondation (ce dernier usage étant réservé aux voies à faible trafic). Les précautions d'emploi consistent notamment à éviter le contact avec les eaux superficielles ou souterraines. A l'étranger, le taux d'utilisation des MIOM est contrasté : certains pays n'en font pas alors que d'autres visent un ré-usage/recyclage totale de leur production. La recherche est active sur ce matériau au niveau international. Son principal enjeu est la compréhension du comportement environnemental et mécanique à long terme du matériau en conditions réelles d'utilisation.

Définition

Les Mâchefers d'Incinération d'Ordures Ménagères (MIOM) 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.

Cette définition exclut les résidus issus de fours à lit fluidisé et des fours à thermolyse (ou pyrolyse) dont les caractéristiques physico-chimiques sont très différentes.

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 déchloration 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).

Textes spécifiques de référence

Sommaire :

1 - Documents réglementaires

2 - Documents techniques

3 – Documents administratifs

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.

2 - Documents techniques

Guide méthodologique pour l'échantillonnage des mâchefers d'usine d'incinération d'ordures ménagères à la production sur flux (SVDU^[1], 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^[2] 103 sur l'utilisation des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères en technique routière (SETRA^[3], 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^[4] Ile-de-France, Contrat de Plan interrégional du Bassin parisien, SYCTOM, SVDU^[5], Novembre 1998).

- Guide d'utilisation en travaux publics : graves de recyclage. Ouvrage collectif. Région, la DDE, le Conseil Général, les Travaux Publics, l'UNICEM, la SRIR du Rhône et le Grand Lyon (2004).

3 – Documents administratifs

- Circulaire du 1^{er} 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.

Origine, formation et élaboration

Sommaire :

1 - Matière première

2 – Processus de fabrication

3 – Préparation éventuelle

1 - Matière première

La matière première des MIOM est multiple et variable (en particulier dans l'espace : zones urbaines, zones rurales, zones côtières, influence du tri). Les MIOM 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^[6]). 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 (DAS^[7]).

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^[8] (*déchets dangereux*) avant évacuation;
- d'une unité d'entreposage des MIOM^[9] (*déchets non dangereux*) avant évacuation.

Plus de détails : [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 MIOM permet d'y accéder). Elle varie selon le fonctionnement du four : sa charge et le pouvoir calorifique inférieur - *PCI*^[10] - 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, ~~ou~~ 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 MIOM peuvent ensuite être refroidis par aspersion, ce qui permet de rabattre les poussières. A ce stade, on parlera de « MIOM bruts ».

3 – Préparation éventuelle

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

3.1 – Opérations en sortie de four

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

- :

- [le](#) criblage, permettant de débarrasser les MIOM des déchets les plus volumineux, notamment des déchets métalliques, et de briser d'éventuels blocs MIOM-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 MIOM. Ces derniers peuvent être entreposés momentanément

avant leur envoi vers une IME ou un centre de stockage permanent de classe II (ou *décharge de classe II*).

3.2 - Préparation à l'emploi en IME

Dans son chapitre II (Conditions de valorisation), la circulaire considère 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 et ne portent pas que sur les MIOM « V », mais aussi sur les MIOM en cours de maturation (MIOM « M »).

Pour être homogène du point de vue terminologique, on dira que les matériaux issus d'une IME sont des « MIOM élaborés ». Les IME entrent dans la nomenclature des [installations classées pour la protection de l'environnement](#), à la rubrique 322-A ou 322-B-1 en cas d'opérations de broyage (Circulaire du 9 mai 1994).

- Les catégories de MIOM

Les MIOM admis à rejoindre une IME en vue de leur préparation à l'emploi en technique routière, doivent remplir au minimum les conditions de la catégorie « M » définie par la [circulaire du 9 Mai 1994](#) (employé par analogie à « maturation »). L'appartenance des MIOM à cette catégorie est déterminée par des analyses périodiques au stade de leur production, comportant une mesure de leur taux d'imbrûlés (contrôle de la qualité de l'incinération) et un test de potentiel polluant, définis dans la [circulaire du 9 Mai 1994](#) et son annexe II. Les MIOM ne répondant pas aux seuils de la catégorie « M », entrent dans la catégorie « S » (employé par analogie à « stockage permanent ») et doivent rejoindre directement une installation de stockage permanent de déchets ménagers et assimilés, dite *décharge de classe II*. La maturation, processus physico-chimique spontané se mettant en place au sein des MIOM dès leur sortie du four, doit aboutir à une réduction suffisante de leur potentiel polluant pour répondre aux critères de la catégorie « V » (par analogie à « valorisation »), autorisant leur utilisation en technique routière. La circulaire du 9 Mai 1994 fixe à 12 mois au maximum le séjour en IME. Passé ce délai, les MIOM éventuellement demeurés en catégorie « M » doivent être évacués vers une *décharge de classe II*.

- 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 MIOM en sortie de four, est une de principales réactions identifiées dans le processus de maturation des MIOM stockés. 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 OH^- conduisant à des pH très alcalins (> 12). Le pH alcalin favorise la diffusion du CO_2 atmosphérique dans l'eau d'hydratation des MIOM sous forme CO_3^{2-} , ce qui entraîne la précipitation de carbonates et notamment de la calcite (CaCO_3). La dissolution de CO_2 dans l'eau se traduit par une neutralisation progressive des ions 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 (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 MIOM en vue de leur utilisation en technique routière sont :

- le criblage, éventuellement complété par un concassage, en vue de faire rentrer le matériau dans un fuseau granulométrique de [GNT L11](#);
- 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 MIOM. Les matériaux extraits rejoignent des filières de valorisation matière.

- Les traitements éventuels des MIOM par ajout de liants

La [circulaire du 9 Mai 1994](#) prévoit dans son chapitre III (Stabilisation des mâchefers) qu' « en complément de la simple maturation [...], des traitements appropriés, notamment à l'aide de liants hydrauliques, peuvent être envisagés afin de réduire le potentiel polluant de certains mâchefers », en précisant qu' « il conviendra de limiter l'application de ces procédés aux seuls mâchefers intermédiaires », c'est à dire les MIOM de catégorie M.

Aujourd'hui, différentes entreprises routières et de recyclage, proposent 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 MIOM d'un gisement local. 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 MIOM 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.

La note d'information CD 103 du SETRA d'août 1997 précisait que les connaissances rassemblées alors ne permettaient pas de conclure quant aux possibilités d'utilisation des mâchefers traités par un liant, compte tenu notamment des risques de gonflement (SETRA, 1997). Il peut en effet arriver que l'ajout de liant hydraulique à des mâchefers se traduise plus ou moins rapidement par des réactions de gonflement (Alkemade et al., 1994). Le guide technique d'Ile-de-France de novembre 1998 (noté par la suite **GTIF**), indique d'ailleurs que l'état des connaissances ne permet pas de fixer des règles de dimensionnement prenant en compte les performances mécaniques d'un MIOM traité. Pour l'heure on ne peut donc que conseiller aux utilisateurs de se renseigner auprès des producteurs pour obtenir les garanties nécessaires à leur bon usage et à leurs performances.

Caractéristiques physico-chimiques

Sommaire :

1 – Composition élémentaire

2 – Composés organiques

3 - Caractéristiques minéralogiques

1 – Composition élémentaire

La composition élémentaire des MIOM 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 MIOM évoluera aussi en fonction de l'efficacité des opérations de retrait des métaux et des imbrûlés. Un même MIOM 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.

Il n'existe pas actuellement de données synthétiques sur la composition élémentaire des MIOM en France. Toutefois, dans le cadre d'une synthèse portant sur des mâchefers produits aux Etats-Unis, au Canada, en Suisse, au Danemark, aux Pays-Bas et en

Allemagne, l'International Ash Working Group (IAWG, 1997), présente une liste de 44 éléments, certains étant des majeurs (> 10 g/kg), d'autres des mineurs (> 1 g/kg et < 10 g/kg), d'autres des éléments-traces (< 1 g/kg). Ces données ont été complétées par des observations plus récentes du LCPC (François, 2001a) sur des MIOM d'origines française ou étrangère lorsque leurs valeurs sortaient de la fourchette fournie par l'IAWG.

Le compartiment du milieu naturel en contact immédiat et durable avec les MIOM utilisés en construction routière est le sol. Il est donc intéressant, afin de relativiser les teneurs relevées dans les MIOM, de les comparer aux gammes de teneurs des sols (Lindsay, 1979, *in* IAWG, 1997) en rappelant que teneur totale ne signifie pas potentiel mobilisable (cf. § Caractéristiques environnementales). Dans le tableau suivant on voit que deux éléments, Cu et Zn, apparaissent en quantité systématiquement supérieure à la gamme de teneurs dans les sols (colonne [MIOM] > [Sols]), et de beaucoup (plus de 100 fois plus). Des éléments apparaissent en quantité supérieure ou égale à la gamme de teneurs dans les sols (colonne [MIOM] > = [Sols]), avec toutefois des nuances : plus de 100 fois supérieure (cas de Cd et Pb), plus de 10 fois supérieure, ou moins de 10 fois supérieure. Des éléments apparaissent en quantité supérieure, égale ou inférieure à la gamme de teneurs dans les sols (colonne [MIOM] > = < [Sols]), leur maximum étant en outre toujours moins de 10 fois supérieur à la teneur maximale dans les sols. Enfin, des éléments apparaissent en quantité égale ou inférieure à la gamme de teneurs dans les sols. C'est notamment le cas des majeurs comme Al, C, Ca, Fe, K, Si.

Tab. 1 : Teneurs élémentaires comparées entre MIOM et sols – d'après IAWG, 1997 et François, 2001a

[MIOM] > [Sols] (> 100)	[MIOM] > = [Sols]			[MIOM] > = < [Sols] (> 10)	[MIOM] = < [Sols]
	> 100	> 10	< 10		
Cu, Zn	Cd, Pb	Ag, B, Br, Cl, Co, Hg, Mo	Cr, Na, P, Sn	As, Mg, Se	Al, Ba, C, Ca, F, Fe, K, Mn, N, S, Si, Sr, Ti, V.

2 – Composés organiques

La persistance de matière organique dans les mâchefers est liée à la nature des déchets introduits dans le fours et aux conditions de fonctionnement du four (température, brassage, temps de séjour, aération). On observe ainsi souvent des imbrûlés dans les MIOM : 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 MIOM s'étalant de 250 à 2000 mg/kg de MIOM sec (Pépin et al., 2001). La [circulaire du 9 Mai 1994](#) demande 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 (cf. § L'essai de contrôle en vigueur).^[12]

La matière organique dans les MIOM (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 composés pouvant présenter des risques pour la santé humaine. Il s'agit de molécules organochlorées : polychlorodibenzodioxines (PCDD – dites « dioxines »), polychlorodibenzofuranes (PCDF – dites « furanes »), chlorophénols (CP), chlorobenzènes (CB), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), polychlorures biphényles (PCB). Toutefois les études relatives aux polluants organiques des mâchefers sont encore peu nombreuses. Des études sont en cours en France à l'INERIS notamment.

L'IAWG a réalisé en 1997 une compilation des données disponibles sur les mâchefers au niveau international. Le tableau suivant 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 de valeurs de référence.

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

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

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 MIOM 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 MIOM 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 MIOM 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 MIOM 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 MIOM/REFIOM, les données étrangères ne sont pas directement comparables aux données Françaises.

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

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

3 - Caractéristiques minéralogiques

Les MIOM 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, des éléments polluants peuvent en effet se trouver fixés dans des espèces minérales plus ou moins stables. D'autre part, le

développement de certains minéraux au sein des MIOM peut faire évoluer leurs propriétés physiques (gonflement, rigidification).

L'étude minéralogique des MIOM 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 récents réalisés en France (Clozel et al., 1999 ; [Bodénan 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 MIOM 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 ordures ménagères sont mélangés. Les débris de verre atteignant leur point de fusion donneront par trempe du verre amorphe. Ceux ne fondant pas complètement qui auront le temps de cristalliser au cours de la phase de 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 MIOM 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 MIOM 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 MIOM sont présentées dans le tableau suivant. Les espèces les plus souvent observées sont en caractères gras.

Tab. 4 : Principales espèces minérales identifiées

Famille	Espèce minérale	Formule	Références
Silicates	Quartz	SiO ₂	Stämpfli, 1992 ;
	Géhlénite/Akermanite	(Ca,Na) ₂ (Al,Mg)(Si,Al) ₂ O ₇	Vehlow et al. 1992 ;
	Clinopyroxènes	Ca(Fe,Mg,Al)(Si,Al) ₂ O ₆	Kirby & Rimstidt, 1993 ;
	Plagioclases	(Ca,Na)(Si,Al) ₄ O ₈	Eighmy et al., 1994 ;
	Pseudowollastonite	CaSiO ₃	Pfang-Stotz & Schneider, 1995 ;

	Alite	Ca_3SiO_5	Freyssinet et al., 1998 ;
	Larnite	Ca_2SiO_4	Clozel-Leloup et al., 1999 ;
	Mullite	Al_2SiO_5	Eypert-Blaison et al., 2000 ;
	Olivine calcique	$(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Ca})\text{SiO}_4$	Delville et al., 2001.
	Talc	$\text{Mg}_3(\text{OH})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}$	
Oxydes	Magnétite	Fe_3O_4	
	Hématite	Fe_2O_3	
	Wüstite	FeO	
	Zincite	ZnO	
	Corindon	Al_2O_3	
	Rutile	TiO_2	
	Spinelle	MgAl_2O_4	
	Hercynite	FeAl_2O_4	
Hydroxydes	Portlandite	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	
	Goethite	$\text{FeO}(\text{OH})$	
	Bohemite-Bayerite-Gibbsite	$\text{Al}(\text{OH})_3$	
Carbonates	Calcite	CaCO_3	
	Siderite	FeCO_3	
Chlorures	Halite	NaCl	
	Sylvite	KCl	
	Nantokite	CuCl	
Phosphates	Apatite	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{F}, \text{Cl})$	
Sulfates	Anhydrite	CaSO_4	
	Gypse	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
Sulfures	Pyrrhotite	FeS	

L'analyse minéralogique des MIOM 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_2S , C_3S . Ceux-ci sont toutefois présents en trop faible quantité pour jouer un rôle **de liant dans la prise** hydraulique dans les MIOM. Des observations de chantier attestent d'ailleurs d'une évolution de la rigidité des plates-formes en MIOM 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 ($\text{Al}(\text{OH})_3$), 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 MIOM permet de prévenir ce risque.

Caractéristiques géotechniques

Sommaire :

- 1 – Essais de caractérisation géotechnique
- 2 – Classification pour emploi

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 [L13](#), 1992), dit aussi guide des

terrassément routiers (« **GTR**[14] »), 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*.

Pour ce qui concerne les MIOM, 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 mâchefers (**GTIF**[15]).

Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques géotechniques mesurées sur les MIOM de catégorie V en France.

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

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

* 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 MIOM sont sensibles à l'excès d'eau (Fraquet & et Boucheny, 2001). [16]

** La forte variabilité des coefficients peut s'expliquer par la plus ou moins forte teneur en éléments durs dans les MIOM (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 MIOM (ici *indice CBR immédiat*) à la teneur en eau (François et al., 2000). Elle montre aussi que la portance des MIOM 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 MIOM récupéraient leurs caractéristiques de portance.

Plus de détails : [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 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 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~~ Peu d'études de laboratoire ont été conduites sur le comportement au gel des mâchefers. De ces quelques études, les MIOM apparaissent peu ou non gélifs. Toutefois, pour rassurantes qu'elles soient, ces études ne sont pas suffisamment nombreuses pour permettre de conclure pour les MIOM 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 MIOM 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 MIOM 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 MIOM en tant que matériau de construction routière dans le référentiel technique actuel.

2 – Classification pour emploi

2.1 – Matériau de terrassement

Dans la norme **NF P 11-300**, les MIOM sont classés 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 MIOM 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 ».

On remarquera la grande similitude entre cette classification et celle de la [circulaire de Mai 1994](#). Le **GTR datant de 1992, sa classification en est toutefois indépendante.**

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,->

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'un MIOM 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 MIOM, sans assimilation à un matériau naturel.

2.2 – Matériau d'assise

La norme XP P 18-540 de 1997 qui classe les granulats utilisables pour la construction des couches de fondation, de base et de liaison, ne couvre pas le cas des MIOM, ni en tant que granulats « artificiels », ni en tant que granulats « recyclés ». Ils sont donc classés en effectuant un rapprochement avec les autres matériaux. Selon le **GTIF**, faute de référentiel prenant en compte les MIOM, par rapprochement avec les classes de la norme XP P 18-540, les MIOM criblés se présentent sous forme de graves (0/20 mm ou 0/31,5 mm), généralement de catégorie **a** (au sens des caractéristiques de fabrication des graves), et de catégorie **E** ou **F** selon leur résistance mécanique. Par référence à la norme NF P 98-129 (Assises de chaussées – Graves non traitées – Définition – Composition – Classification), les MIOM sont assimilables à une **grave de type A (GNT A)** : non traitée, non recomposée et conforme à un fuseau de spécification (**GTIF**).

Caractéristiques environnementales

Sommaire :

1 – L'essai de contrôle en vigueur

2 – Une caractérisation à plusieurs stades

Les MIOM 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. Une synthèse de l'ensemble des données produites en la matière serait fort utile. Ceci relève de la recherche, nationale et internationale, mais ne concerne pas directement l'utilisateur potentiel de MIOM en construction routière, pour qui la référence doit être, si elle existe, et c'est le cas pour les MIOM en France, la réglementation en vigueur.

1 – L'essai de contrôle en vigueur

L'essai préconisé par le ministère de l'Environnement pour l'appréciation des caractéristiques environnementales des mâchefers est l'essai de lixiviation normalisé NF X 31-210 (Déchets – Essai de lixiviation). La [circulaire du 9 Mai 1994](#) préconise d'appliquer cet essai dans la version consistant à réaliser 3 lixiviations successives (3 fois 16 heures, pour un échantillon de 100 grammes tamisé et broyé à 4 mm, agité dans un volume d'eau déminéralisée selon un rapport masse de matériau sur masse de liquide, de 1/10). La circulaire demande l'analyse des paramètres suivants : mercure, plomb, cadmium, arsenic, chrome hexavalent, sulfates, carbone organique total. La fraction soluble est exprimée comme le rapport au poids sec de l'échantillon lixivié du cumul des valeurs obtenues par pesée du résidu sec de chacun des trois lixiviats. Les normes d'analyse de chacun de ces paramètres sont fixées par l'annexe II (Test de potentiel polluant) de la circulaire. La détermination du taux d'imbrûlés (ou « perte au feu ») est aussi demandée par la circulaire. La méthode n'est pas normalisée; le protocole de mesure est indiqué dans l'annexe II de la circulaire.

La mesure du taux d'imbrûlés permet de vérifier la qualité de l'incinération. La fraction soluble est un paramètre global, supérieur à la somme des quelques éléments analysés. Elle intègre notamment les chlorures, le calcium, l'aluminium. Enfin, cet essai de lixiviation n'est qu'un test de conformité par rapport à des seuils pour certains éléments. Il est certes indicatif

mais il ne permet pas d'apprécier directement le risque représenté par le relargage dans l'ouvrage où le matériau sera utilisé.

Le tableau ci-dessous donne les seuils fixant les trois catégories de mâchefers selon l'annexe III de la circulaire de Mai 1994 (cf. § Classement des MIOM).

Tab. 6 : Catégories de mâchefers

Paramètres	V	M	S
Taux d'imbrûlés	< 5 %	< 5 %	> 5 %
Fraction soluble	< 5 %	< 10 %	> 10 %
Lixiviats			
Hg	< 0,2 mg/kg	< 0,4 mg/kg	> 0,4 mg/kg
Pb	< 10 mg/kg	< 50 mg/kg	> 50 mg/kg
Cd	< 1 mg/kg	< 2 mg/kg	> 2 mg/kg
As	< 2 mg/kg	< 4 mg/kg	> 4 mg/kg
Cr ⁶⁺	< 1,5 mg/kg	< 3 mg/kg	> 3 mg/kg
SO ₄ ²⁻	< 10 000 mg/kg	< 15 000 mg/kg	> 15 000 mg/kg
COT	< 1 500 mg/kg	< 2 000 mg/kg	> 2000 mg/kg

2 – Une caractérisation à plusieurs stades

L'appréciation des caractéristiques environnementales des mâchefers en laboratoire doit servir à évaluer les risques pour l'homme et l'environnement au niveau : de *l'entreposage*, du *chantier* et de *l'ouvrage*. Dans le cas des MIOM, la question des risques pour l'eau au niveau des trois phases se pose, ainsi que celle pour l'air au niveau des phases d'entreposage et de chantier. Les MIOM 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* [17]. Toutefois, pour l'heure, c'est essentiellement la cible Eau qui a fait l'objet d'études.

2.1 – Un matériau évolutif

Les MIOM 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 ;
- le stade du matériau mûri (dits usuellement « mûré »), prêt à être utilisé ;
- le stade du matériau en place dans laquelle, malgré l'évolution probable du matériau sur plusieurs années, on ne distinguera pas en l'état actuel des connaissances, de sous-phases. La description des caractéristiques environnementales des MIOM 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 encore insuffisamment connues pour expliquer parfaitement l'évolution des MIOM 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.

2.2 – Sources de données

Les exploitants des usines d'incinération réalisent la caractérisation de leur production de mâchefers selon la méthode préconisée par le ministère de l'Environnement (cf. § L'essai de contrôle en vigueur). Le rythme d'analyse est mensuel en suivi courant, les caractéristiques moyennes des MIOM sont calculées sur la moyenne glissante des résultats de 7 échantillons successifs (voir l'annexe IV de la circulaire « Suggestions d'organisation de l'analyse initiale des caractéristiques des mâchefers produits par un four d'incinération »). Les exploitants des IME [18] réalisent aussi une caractérisation pour contrôler la qualité des mâchefers qu'ils réceptionnent et dont ils suivent l'évolution par lots (lots hebdomadaires, bi-mensuels ou mensuels selon les tonnages des IME). Les mâchefers sont ensuite contrôlés au moment de leur commercialisation, l'exploitant d'IME pouvant notamment fournir une fiche technique produit (FTP [19]) caractérisant le lot utilisé.

Les utilisateurs potentiels se tourneront vers les exploitants d'IME pour obtenir les caractéristiques environnementales requises du matériau qu'ils sont susceptibles d'utiliser. On ne peut pas 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.

Les caractéristiques des MIOM en place sont évidemment moins nombreuses, leur acquisition relève de la recherche.

2.3 – Transfert vers l'eau

- Exemples de matériau frais

Des exemples de résultats à l'essai de lixiviation de mâchefers de fraîche production sont donnés ci-dessous. Les MIOM 1 sont des matériaux bruts. Les MIOM 2 n'ont subi qu'un grossier déferrailage. Ces deux matériaux ne sont pas destinés à la construction routière. Les MIOM 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 diffèrent de la circulaire de Mai 1994 mais permettent de mieux comprendre l'évolution des MIOM.

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

Paramètres	Unité	MIOM 1	MIOM 2	MIOM 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 ₄ ²⁻	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 ⁻	mg/kg	519	-	2 448
Fe	mg/kg	< 0,2	1,7	1,2
Al	mg/kg	938	692	459

On voit que 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 MIOM, faute de déferrailage. 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 matériau en maturation

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

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

Paramètres	Unité	MIOM 3	MIOM 3	MIOM 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 ₄ ²⁻	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 ⁻	mg/kg	3 198	2 383	2 114
Fe	mg/kg	2,2	< 0,2	< 0,9
Al	mg/kg	285	927	1 396

Le pH des MIOM ayant avancés en maturation est plus faible. On peut toutefois observer des pH plus faibles que ceux-ci. Le pH des MIOM 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 MIOM 3 ne sont pas encore en catégorie V après 5 mois (du fait du plomb notamment). Ils le deviennent à 6 mois. Les MIOM 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

Peu de données ont été collectées à ce jour sur la caractérisation via l'essai NF X 31-210, de MIOM prélevés dans les corps de chaussées. Le tableau ci-dessous fournis deux résultats obtenus en France après 20 ans (François et al., 2000) sur des MIOM dont le système de production était, certes, différent d'aujourd'hui, mais dans lesquels le processus physico-chimique de maturation est bien le même.

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

Paramètres	Unité	MIOM 5	MIOM 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 ₄ ²⁻	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 ⁻	mg/kg	37	38
Fe	mg/kg	2,5	10
Al	mg/kg	< 6	15

Le pH des MIOM anciens est beaucoup plus faible que celui des MIOM de fraîche production. Ceci contribue à limiter la solubilisation des métaux. La solubilité des MIOM 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.

2.4 – Transfert par l'air

Les données manquent sur ce point.

Aspects sanitaires

Aucune information n'est disponible pour l'instant sur ce sujet.

Utilisation dans les infrastructures routières

Sommaire :

1 - Utilisation en remblai

2 – Utilisation en couche de forme

3 – Utilisation en assises de chaussées

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

- des prescriptions de la [circulaire de Mai 1994](#) d'une part;
- des référentiels techniques de construction routière d'autre part.

L'annexe V de la circulaire de Mai 1994 limite l'utilisation des MIOM :

- aux structures routières et de parking (couches de forme, de fondation et de base) à l'exception des chaussées réservoir ou poreuses ;
- aux remblais compactés de moins de 3 mètres de hauteur, sans aucun dispositif d'infiltration et à condition qu'il y ait en surface :
 - une structure routière ou de parking ;
 - un bâtiment couvert ;
 - un recouvrement végétal sur un substrat d'au moins 50 cm.

La circulaire précise aussi des critères d'Exclusion :

~~L'annexe~~ Ainsi l'annexe V de la circulaire précise que les MIOM de catégorie V doivent être utilisés en dehors des zones inondables et des périmètres de protection rapprochés des captages d'alimentation en eau potable ainsi qu'à plus de 30 mètres de tout cours d'eau. Elle indique aussi "qu' « il conviendra de veiller à la mise en œuvre de tels matériaux à une distance suffisante du niveau des plus hautes eaux connues », et "qu' « ils ne doivent pas servir au remblaiement de tranchées comportant des canalisations métalliques ou pour la réalisation de systèmes drainants ».

Cette annexe indique enfin que la mise en place des MIOM doit être effectuée en veillant à limiter les contacts avec les eaux de pluies, les eaux superficielles et souterraines.

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 MIOM, 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 MIOM 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 MIOM comme « moyennement difficiles » (DC2) à « difficiles » (DC3) à compacter à l'état sec.

1 - Utilisation en remblai

Pour les conditions d'emploi en remblais (qui ne concernent de fait que les matériaux **F61** puisque les MIOM 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 : $10 = \text{IPI} = 20$; ou : $1,2 W_{\text{OPN}} = \mathbf{W} < 1,3 W_{\text{OPN}}$;

- **F61 m** (moyen), dont l'état hydrique est défini par : $20 < \text{IPI}$; ou : $0,8 W_{\text{OPN}} = \mathbf{W} < 1,2 W_{\text{OPN}}$;

- **F61 s** (sec), dont l'état hydrique est défini par : $0,6 W_{\text{OPN}} = \mathbf{W} < 0,8 W_{\text{OPN}}$;

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 : $1,3 W_{\text{OPN}} < \mathbf{W}$

- F61 ts (trop sec), dont l'état hydrique est défini par : $\mathbf{W} < 0,6 W_{\text{OPN}}$;

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 mâchefers. Le **GTIF** propose, comme le préconise le **GTR**, un tableau de compactage avec les paramètres Q/S, épaisseur compactée, *vitesse de translation* [\[20\]](#) du compacteur.

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 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 MIOM 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 MIOM 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).

3 – Utilisation en assises de chaussées

Le **GTIF** indique que les caractéristiques géotechniques des MIOM (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 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 MIOM, de l'ordre de 15 cm. Celle-ci servira à exercer une contre-pression.

Pour le compactage des MIOM en assises de chaussée, on visera un objectif de *qualité q2* en se référant aux certificats d'aptitude technique des matériels (CATM)^[21].

Sources sur le territoire français

En 1999, environ 11 millions de tonnes de déchets ménagers et assimilés ont été incinérés dans 217 usines (source ADEME, ITOM 99). La production de MIOM peut en être estimée à environ 3 millions de tonnes (Boisseau, 2001), et leur répartition géographique, déduite du recensement de l'ADEME des déchets par région (données 1998) serait la suivante :

Tab. 10 : Estimation de la répartition régionale de la production de MIOM – d'après Boisseau, 2001

Régions	Part (%)
Ile-de-France	30
Rhône-Alpes	11
Provence-Côte-d'Azur	8
Bretagne, Nord-Pas de Calais	7
Pays de Loire	5
Alsace, Aquitaine	4
Centre, Midi-Pyrénées, Haute-Normandie	3
Chaque autre région	< 2

Près de 50% des MIOM produits proviennent des régions Ile-de-France, Rhône-Alpes, et Provence-Côte d'Azur.

Du fait des exigences d'homogénéité et de qualité requises sur les matériaux de construction routière, on ne peut considérer comme MIOM utilisables en application routière que les MIOM élaborés, et donc comme source de matériau que les IME et non les usines d'incinération. Les caractéristiques géotechniques et recommandations d'utilisation indiquées plus haut (dans les § 5 et 8) ne portent donc que sur des MIOM élaborés.

Les IME sont réparties de façon inégale sur le territoire; elles sont peu nombreuses dans le Centre-Ouest et le Sud-Est, la filière incinération étant moins développée dans ces régions (Lac & Fourcy, 2001). Des données ADEME complétées par une enquête de mise à jour réalisée dans le cadre d'OFIR par le LCPC aboutissent au recensement de 56 IME de plus ou moins grande taille, réparties sur 36 départements métropolitains, traitant 2,8 millions de tonnes de MIOM par an. Il existe quatre projets d'installations nouvelles, concernant trois départements. Pour deux départements, il s'agira des premières installations (Haute-Vienne, Marne). Enfin, il existe une installation en Martinique, traitant 10 000 tonnes/an.

Une étude réalisée par Trivalor pour le compte de l'ADEME (Lac & Fourcy, 2001), indique que les IME sont le plus souvent attenantes aux usines d'incinération, ou proches. Les IME privées indépendantes des UIOM, et qui traitent les plus gros tonnages, approvisionnées par une ou plusieurs usines, en sont généralement distantes de 10 à 50 km (voire 100 à 300 km parfois). Les IME ont des capacités très variables, de 10.000 t/an à 200.000 t/an, la moyenne étant de 40.000 t/an et les plus importantes installations (plus de 100.000 t/an) se situant en région parisienne. Sur les 32 IME (opérations aidées par l'ADEME), une seule ne pratiquait pas de criblage, la granulométrie recherchée y étant obtenue par concassage, 30 pratiquaient la séparation des métaux ferreux et 22 celle de métaux non ferreux.

Emplois répertoriés

Sommaire :

1 – Réalisations en France

2 – Retour d'expérience

3 – Utilisation à l'étranger

1 – Réalisations en France

Les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères ont été utilisés de longue date pour des travaux routiers, bien avant 1994 (réglementation sur leur utilisation) et 1991 (définition des MIOM). Par exemple, deux cent chantiers ont été réalisés de 1964 à 1972 en région parisienne avec des mâchefers provenant des usines d'Issy-les-Moulineaux, Saint-Ouen et Ivry-sur-Seine (Bauchard, 1979). Toutefois, d'une manière générale, bien souvent les traces de la localisation et des caractéristiques des ouvrages les plus anciens ont disparu. Le **GTIF** présente une liste relativement fournie d'ouvrages postérieurs à 1989 dans lesquels les mâchefers ont été utilisés en remblais, couches de forme ou d'assises, sous forme de GNT ou traités au liant hydraulique ou hydrocarboné. Certains de ces exemples sont présentés ici, complétés par ceux d'autres réalisations représentatives en province.

2 – Retour d'expérience

Peu d'ouvrages routiers contenant des MIOM ont fait l'objet d'un suivi ou d'une auscultation approfondie permettant de tirer des enseignements de l'évolution du matériau en place à plus ou moins long terme. Ces ouvrages sont soit des chaussées classiques, ne se distinguant pas dans la construction ni dans l'usage des ouvrages habituels, soit des chaussées expérimentales dont la technique de construction (aux fins de l'étude) et l'usage (notamment en termes de trafic), peuvent avoir été sensiblement différents. Par ailleurs, les durées de vie et d'observation de ces ouvrages peuvent être significativement différentes. Ces **études** ont fait l'objet de publications ~~vers lesquelles on renverra les personnes intéressées~~ :

- 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.
- [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.
- [Drouadaine I., Seigneurie C. & Jozon C. \(1997\)](#), Etude de l'impact environnemental de la valorisation des mâchefers d'incinération en technique routière, TSM, 10, Octobre, pp. 48-54.
- François D., Legret M., Demare D., Fraquet P. & Berga P. (2000), Comportement mécanique et environnemental de deux chaussées anciennes réalisées avec des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 227, pp. 15-30.
- 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.
- [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, 4, avril, pp. 27-34
- Silvestre P. & Rampignon J.-P. (1995), Valorisation en structure routière du mâchefer d'incinération d'ordures ménagères de l'usine de Lyon-Sud, TSM, 5, mai, pp. 427-430.

Il existe actuellement très peu de **chantiers expérimentaux** en France faisant l'objet d'un suivi mécanique et/ou environnemental, par rapport à ceux suivis dans les années 90.

3 – Utilisation à l'étranger

L'utilisation des MIOM à l'étranger est guidée comme en France par la coexistence de deux objectifs : la préservation des gisements de granulats naturels, et la volonté d'optimiser le recyclage des matériaux pour limiter la mise en décharge. En outre, l'utilisation des MIOM permet de réduire le coût lié à l'incinération des ordures ménagères. Ainsi, la valorisation des MIOM est-elle principalement induite par la volonté politique. C'est le cas au Danemark, aux Pays-Bas et en Allemagne (dans certains *Länder*) (Méhu & Orphelin, 2001).

Au **Danemark**, les MIOM sont utilisés depuis 1974 (couches de fondation, pistes cyclables, parkings), mais les premières exigences environnementales ne datent que de 1983. Les

recommandations techniques pour l'emploi en couche de fondation datent de 1989 (Pihl et al., 1989). De nouveaux critères environnementaux sont en cours de préparation.

Aux **Pays-Bas**, l'utilisation des MIOM, comme de tout matériau de construction, est prise en compte dans le « Building Material Decree » depuis 1999, d'une part, et doit répondre aux mesures de protection du « Soil Protection Act » de 1987 d'autre part. De fait, moyennant ces règles de protection des sols et des eaux souterraines, l'objectif est de réutiliser la totalité des MIOM (Méhu & Orphelin, 2001).

En **Allemagne**, en 1991, 60% des MIOM étaient utilisés (Krass & Radenberg, 1994). Disposant d'un guide technique d'utilisation depuis 1983, l'Allemagne a promulgué en 1994 une loi (« LAGA ») incitant à la réutilisation de tous les résidus et mettant particulièrement l'accent sur les MIOM.

En **Suède**, bien qu'autorisée, l'utilisation des MIOM reste très marginale. Il n'y existe ni réglementation ni référentiel technique traitant particulièrement des MIOM (IAWG, 1997). Toutefois la Suède mène des études pour la réutilisation des MIOM en construction routière (Méhu & Orphelin, 2001).

Le **Royaume-Uni** qui a longtemps privilégié la mise en décharge des MIOM, commence à s'intéresser à leur réutilisation.

D'autres pays, bien que ne les utilisant pas, mènent néanmoins des études en ce sens : **Autriche** (programme Alt-Mat), **Portugal** (programme Valomat).

A l'extérieur de l'Europe, on peut mentionner le **Japon**, qui bien qu'ayant largement recours à l'incinération des ordures ménagères (en 1991, la production de MIOM et REFIOM représentait 5,9 millions de tonnes), n'utilise pas les MIOM (IAWG, 1997). Aux **Etats-Unis**, la mise en décharge des ordures ménagères reste la règle; seuls quelques Etats de la côte Est confrontés à des problèmes d'espace et ayant recours à l'incinération font exception et s'intéressent à la réutilisation des MIOM, sans disposer pour autant de référentiel technique spécifique.

Recherches en cours

Sont indiquées ci-dessous les études et recherches concernant les MIOM et auxquelles participent les membres de l'observatoire. Sont aussi indiquées les thèses en cours à l'échelle nationale.

- Etude minéralogique et physico-chimique des mâchefers d'incinération des ordures ménagères en vue d'une utilisation en technique routière, Thèse de l'université de Clermont-Ferrand (N. Delville), cofinancée par l'ADEME, le Conseil Général de Corrèze, le LCPC et Appia (2002).
- Etude de l'influence des conditions de conservation d'éprouvettes de MIOM traités aux liants hydrauliques sur leurs caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques, LCPC (J.C. Auriol, G. Platret), LREP (M. Kergoët), LROP (S. Hervy).
- Les paramètres déterminant le rôle des sols routiers dans le transfert de polluants métalliques issus de déchets utilisés en construction routière, Thèse LCPC – Institut National Polytechnique de Lorraine (M. Bouvet).
- Dioxines dans les mâchefers utilisés en construction routière : caractérisation et mécanismes du potentiel de transfert vers le sol, INERIS (~~R.~~ Badreddine, 2000).

Bibliographie [22](#)

Adam P., Dony Y. ~~&~~ et 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.

- ADEME (2002), Plates-formes de traitement et de maturation des mâchefers. Bilan de 32 opérations françaises aidées par l'Ademe, Rapport détaillé, 91 p..
- 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 materials, 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 déferraillage et du lavage à l'eau, Déchets Sciences et Techniques, 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..
- 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, 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., 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..
- [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.
- 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..
- Clozel-Leloup B., Bodénan 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, 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.
- Fléhoc C., Girard J.P., Bodénan F., Bény C., Crouzet C., Lafforgue M. & Piantone P. (2000), Validation du processus de maturation des mâchefers d'incinération d'ordures

- ménagères par le CO2 atmosphérique : étude isotopique. Rapport BRGM/RP-500026-FR, 34 p..
- François D., Legret M., Demare D., Fraquet P. & 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.
 - Freyssinet P., Piantone P., Azaroual M., Itard Y., Clozel B., Baudron J.C., Hau J.M., Guyonnet D., Guillou-Frottier L., Pillard F. & 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..
 - 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), Verwertungstraten von industriellen Nebenprodukten und recycling-Baustoffen, Beihefte zur mull and Abfall, 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, 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.
 - 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.
 - [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, 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.
 - Pihl K.A., Ahrentzen P. & Kalsmose K. (1989), Subbase of incinerator residues. Guidance-standard specifications. General Working Procedure, Miljoministeriet/Skov-og Naturstyrelsen/Statens Vehjlaboratorium, Laboratoireapport n° 66, Vejdirektoratet.
 - 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.
 - 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..

- Ramade F. (2000), Dictionnaire encyclopédique des pollutions. Les polluants : de l'environnement à l'homme, Ediscience international, 690 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 (1992), Guide technique D 9233. Réalisation des remblais et des couches de forme.
- 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, 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..
- Vehlow J., Pfrang-Stotz G. & Schneider J. (1992), Restoffe-charakterisierung, behandlung, verwertug, Symposium 25 Jahre LIT 5 Jahre TAMARA, Forshung und Entwicklung in Kernforschungszentrum Karlsruhe zur Hausmüllverbrennung Kfk, Karlsruhe, 124 p..

Page: 2

[\[1\] Glossaire](#)

Page: 2

[\[2\] Glossaire](#)

Page: 2

[\[3\] Glossaire](#)

Page: 2

[\[4\] Glossaire](#)

Page: 2

[\[5\] Glossaire](#)

Page: 2

[\[6\] Glossaire](#)

Page: 3

[\[7\] Glossaire](#)

Page: 3

[\[8\] Glossaire](#)

Page: 3

[\[9\] Glossaire](#)

Page: 3

[\[10\] Glossaire](#)

Page: 4

[\[11\] Glossaire](#)

Page: 6

[\[12\] Je me demande s'il n'y a pas un flou entre la circulaire et l'arrêté de 2002?](#)

Page: 9

[\[13\] Glossaire](#)

Page: 10

[\[14\] Glossaire](#)

Page: 10

[\[15\] Glossaire](#)

Page: 10

[\[16\] Bibliographie homogène de dossier à dossier.](#)

Page: 13

[\[17\] Italique, latin](#)

Page: 13

[\[18\] Glossaire](#)

Page: 13

[\[19\] Glossaire](#)

Page: 17

[\[20\] Glossaire](#)

Page: 18

[\[21\] Glossaire](#)

Page: 20

[\[22\] La bibliographie doit être mise à des normes communes à toutes les fiches.](#)

Annexe 11

Phosphogypses

Avertissement

Ce texte qui semble le plus fourni du site Ofrir souffre d'un certain nombre d'handicaps, de nombreuses redites sont présentes dans le texte et certaines ces dernières ressemblent à s'y méprendre à des coupés collés. En outre certaines définitions sont très approximatives pour être par souci de faire simple. En conclusion ce texte nécessite encore un effort de synthèse pour le rendre plus agréable à la lecture. Ensuite pour une application route est-il nécessaire de parler agriculture ?

Valorisation comme régulateur :

Une usine de fabrication de ciment à partir du phosphogypse fonctionne toujours à la Palabora (Afrique du Sud, carbonatite à phosphore et niobium), son principe régénérer l'acide sulfurique par réduction par du coke et par ajout de silicates produire des clinkers servant de base pour la formulation des ciments.

Activité radioactive :

Emission d'un rayonnement par un noyau

Graves activités soude : non graves activités soude

Risque de développement de cancer

Alinéa non aligné

Risque sanitaire agriculture

« et les personnes s'installant sur ces terres après qu'elles ont-aient perdu

Bibliographie

Que ce soit dans le texte comme dans la liste des référence revoir la bibliographie en fonction de normes communes pour tout les dossiers.

Phosphogypses

Résumé

Le phosphogypse est le sous-produit de la fabrication de l'acide phosphorique, résultant de l'attaque sulfurique d'un minerai de phosphate de calcium naturel, l'apatite. Le phosphogypse se présente sous la forme d'une très fine poudre humide.

Le phosphogypse est principalement constitué ~~d'oxydes de soufre de sulfates~~ et de calcium, et dans une moindre mesure ~~d'oxydes de silicium de silice~~, de sodium... Les minerais de phosphate utilisés contiennent de nombreuses impuretés, qui dans la plupart des cas se concentrent dans le phosphogypse. C'est ~~par exemple~~ le cas des éléments traces métalliques (strontium, baryum, cuivre...) et des radio-éléments (²²⁶radium, ²¹⁰plomb, ²¹⁰polonium...).

Le phosphogypse n'est plus valorisé actuellement en France dans les infrastructures routières. Il y a une vingtaine d'années, ce matériau était utilisé seul en tant que remblai, ou bien ajouté ou substitué dans diverses formulations de matériaux servant en **ingénierie technique** routière : graves laitier, cendres volantes, graves ciment...

Le comportement géotechnique du phosphogypse est comparable à celui d'un sable fin anguleux, très propre mais très friable. Les différentes études menées avaient abouti à déconseiller l'utilisation du phosphogypse en remblais routiers, essentiellement pour des raisons économiques, les traitements nécessaires à cette valorisation du phosphogypse le rendant plus coûteux que des matériaux traditionnels.

Du fait ~~de la présence de sulfates dans~~ de son constituant majeur le sulfate de calcium le ~~phosphogypse, son-~~ utilisation du phosphogypse avait été envisagée en mélange avec des laitiers ou des cendres volantes, conduisant à l'obtention de matériaux de bonnes performances mécaniques. L'utilisation de ces matériaux en vraie grandeur avait démontré la faisabilité de telles valorisations. En revanche, la technique de la grave ciment additionnée de phosphogypse n'avait pas donné de résultats probants.

Sur le plan environnemental, –, outre le sulfate, le phosphogypse brut (en l'absence de tout traitement) est susceptible de relarguer des éléments traces métalliques et des radio-éléments dans les eaux, et dans une moindre mesure dans l'atmosphère (radon,...). L'impact de ces relargages sur les écosystèmes a été mis en évidence par des études françaises, aucune n'ayant cependant été réalisée dans une perspective de valorisation du phosphogypse en technique routière. Le risque pour la santé humaine lié à la valorisation du phosphogypse dans des infrastructures routières a fait l'objet de très peu d'études (en particulier aucune étude française), et leurs résultats restent à ce jour contradictoires.

Définition

Le phosphogypse est le sous-produit de la fabrication de l'acide phosphorique, résultant de l'attaque sulfurique d'un minerai de phosphate de calcium naturel, l'apatite. Le phosphogypse fait partie des gypses de synthèse.

Le phosphogypse a une structure analogue a est constitué à plus de 90% de sulfate de calcium hydraté le gypse naturel [Larousse, 1984][NC1]. Il se présente sous la forme d'une très fine poudre humide, avec une teneur en eau de 20 à 30% [Wirsching, 1991 ; Daligand, 2002]. Ce matériau a un comportement géotechnique comparable à celui d'un sable fin anguleux, très propre mais très friable.

Textes spécifiques de référence

Il n'existe pas de textes de référence traitant spécifiquement du phosphogypse. Les deux textes suivants l'évoquent du point de vue de la classification des déchets :

[La décision n°2000/532/CE du 03 mai 2000 de la Commission Européenne](#), remplaçant la décision 94/3/CE établissant une liste de déchets en application de l'article 1^{er}, point a), de la directive 74/442/CEE du Conseil relative aux déchets et la décision 94/904/CE du Conseil établissant une liste de déchets dangereux en application de l'article 1^{er}, paragraphe 4, de la directive 91/689/CEE du Conseil relative aux déchets dangereux.;

[Le décret n°2002-540 du 18 avril 2002 de la République Française](#), relatif à la classification des déchets.

Le décret français n°2002-540 du 18 avril 2002 reprend en droit français la décision européenne n°2000/532/CE du 03 mai 2000. Le phosphogypse est classé dans la catégorie 06 09 « déchets provenant de la chimie du phosphore », qui comprend entre autres les deux rubriques suivantes :

06 09 03 * : déchets de réactions basées sur le calcium contenant des substances dangereuses ou contaminées par de telles substances ;

06 09 04 : déchets de réactions basées sur le calcium autres que ceux visés à la rubrique 06 09 03.

L'astérisque associé à une rubrique attribue une dangerosité aux produits classés sous cette rubrique. Le phosphogypse est classé sous la rubrique 06 09 04, et est donc considéré comme non dangereux au regard de la législation française et européenne.

Origine, formation et élaboration

Sommaire :

1 - Obtention du phosphogypse

2 - Les filières d'orientation du phosphogypse

1 - Obtention du phosphogypse

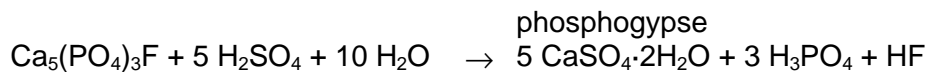
Le phosphogypse est un sous-produit de la fabrication de l'acide phosphorique H₃PO₄. La principale matière première de l'industrie de l'acide phosphorique est le minerai de

phosphate naturel de calcium, qui varie de la fluorapatite $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ ($x = 1$) [INCI2] à la fluor-carbonate-apatite $\text{Ca}_{10}\text{F}_2(\text{PO}_4)_6 \cdot \text{CaCO}_3$ [INCI3] [Wirsching, 1991 ; Carbonell-Barrachina *et al.*, 2002]. Ce phosphate naturel « tout venant » contient en moyenne de 25 à 30% de phosphates P_2O_5 , ce qui s'avère insuffisant pour une commercialisation directe en tant que fertilisant minéral phosphaté [Kongshaug *et al.*, 1991]. Un procédé de fabrication visant à augmenter cette teneur en phosphates est donc employé.

Plus de détails : acide phosphorique

Le procédé de fabrication des phosphates le plus utilisé actuellement passe par l'attaque du phosphate naturel par l'acide sulfurique H_2SO_4 , qui permet d'obtenir l'acide phosphorique [Kouloheris, 1980 ; Hudson and Dolan, 1982 ; Schrödter *et al.*, 1991]. La réaction de cet acide phosphorique sur le phosphate naturel permet d'obtenir le « superphosphate triple », qui contient entre 38% et 45% de phosphates [Kongshaug *et al.*, 1991].

C'est l'attaque sulfurique du phosphate naturel qui conduit à la formation de gypse, appelé dans ce cas phosphogypse, selon la réaction :



Après la fabrication de l'acide phosphorique, le phosphogypse est séparé par filtration.

Ce procédé conduit à la fabrication de 1,7 tonnes de phosphogypse par tonne de phosphate naturel utilisé, soit l'équivalent de 5 tonnes de phosphogypse par tonne de phosphate P_2O_5 produit [Wirsching, 1991].

Plus de détails : acide phosphorique

2 - Les filières d'orientation du phosphogypse

Au niveau mondial, seule une très faible part (environ 5%) du phosphogypse produit trouve un débouché dans une filière de valorisation matière. En dehors des essais de valorisation du phosphogypse en génie civil, et plus particulièrement en assises de chaussées et en terrassement (cf. chapitre Caractéristiques géotechniques et chapitre Utilisation dans les infrastructures routières), il existe aussi d'autres voies de recyclage du phosphogypse :

- **valorisation pour la fabrication du plâtre**

- **valorisation comme régulateur de prise des ciment.**

En ce qui concerne le phosphogypse non valorisé (c'est à dire la majeure partie du phosphogypse), en France il était déversé dans la Seine jusqu'en 1974 (à l'époque, les trois principaux centres de production du phosphogypse étaient situés dans le département de Seine-Maritime ; cf. chapitre Source sur le territoire français). Entre 1974 et le milieu des années 1980, le phosphogypse était immergé dans la Manche à 10 kilomètres des côtes [Ouzon et Makhoul, 1979]. Depuis le milieu des années 1980, le phosphogypse est progressivement déposé à terre sous forme de terrils [Simon, 1990 ; Germain *et al.*, 1995]. Les rejets en mer de phosphogypse ont totalement cessé à la fin de l'année 1992, le recours aux terrils de phosphogypse étant devenu systématique.

Plus de détails : valorisation pour la fabrication du plâtre

Plus de détails : valorisation comme régulateur de prise des ciments

Plus de détails : terrils de phosphogypse

Caractéristiques physico-chimiques

Sommaire :

1 - Caractéristiques générales du phosphogypse

2 - Composition élémentaire

3 - Concentrations en métaux lourds

4 - Activité radioactive du phosphogypse

1 - Caractéristiques générales du phosphogypse

Bien que le phosphogypse ait une structure analogue au gypse naturel [Larousse, 1984], certaines de ses caractéristiques en diffèrent. Le phosphogypse se présente sous la forme d'une très fine poudre humide, avec une teneur en eau de 20 à 30% [Wirsching, 1991 ;

Daligand, 2002]. La courbe granulométrique du phosphogypse est généralement comprise entre 0,01 et 0,5 mm, avec un diamètre moyen des grains D_{50} de l'ordre de 0,05 mm, et plus de 80% de passant à 0,1 mm [Ghafoori and Chang, 1986 ; Lin *et al.*, 1986].

Même lavé, le phosphogypse reste imprégné de traces d'acides libres (H_2SO_4 , HF, H_3PO_4 , H_2SiF_6 ...), et son pH se situe entre 2 et 3 [Mangin, 1978]. De plus, le phosphogypse concentre des impuretés, provenant du minerai de phosphate naturel et ne devant pas se retrouver dans l'acide phosphorique produit, comme du fluorure de calcium et des matières organiques [D'Avout d'Auerstaedt, 1976 ; Wenk and Henkels, 1982 ; Wirsching, 1991 ; Daligand, 2002].

[Plus de détails : gypse naturel](#)

2 - Composition élémentaire

Le Tableau 1 présente les teneurs extrêmes en différents éléments qu'il est possible de mesurer dans un phosphogypse résultant de l'attaque sulfurique de minerais de phosphate de différentes origines.

Élément	Teneur minimum	Teneur maximum
SO ₃	39,6%	47,1%
CaO	27,8%	34,0%
SiO ₂	0,50%	6,00%
Na ₂ O	0,12%	10,0%
C organique	0,10%	2,50%
F	0,10%	1,80%
P ₂ O ₅	0,05%	1,42%
Al ₂ O ₃	0,05%	0,60%
Cl	0,035%	0,045%
MgO	0,01%	0,54%
Fe ₂ O ₃	0,01%	0,25%

Tableau 1 : Composition élémentaire du phosphogypse [Colombel, 1978_a ; Mangin, 1978 ; Gorlé, 1985 ; Simon, 1990 ; SNC-Lavalin, 1993 ; Singh *et al.*, 1996 ; Singh, 2000 ; Sfar Felfoul *et al.*, 2002 ; Singh, 2002]

3 - Concentrations en métaux lourds

Le phosphogypse concentre de nombreux métaux provenant des impuretés du minerai de phosphate. Le Tableau 2 reprend les gammes de concentrations en éléments métalliques rencontrés dans le phosphogypse.

Toutes les fractions granulométriques du phosphogypse ne présentent pas les mêmes caractéristiques [Arocena *et al.*, 1995 ; Rutherford *et al.*, 1996]. La fraction fine (diamètre inférieur à 20 μ m) concentre généralement les métaux lourds, et c'est ainsi que l'on peut y trouver, selon la provenance du minerai de phosphate, des valeurs extrêmes comme : 1 606 mg/kg de strontium, 810 mg/kg de baryum, 594 mg/kg de chrome, 508 mg/kg de cuivre, 398 mg/kg de zirconium, 351 mg/kg de zinc, 249 mg/kg de sélénium, 190 mg/kg de vanadium, 75 mg/kg de thorium, 73 mg/kg d'argent ou de plomb ou encore 19 mg/kg d'uranium.

Élément	Teneur minimum (mg/kg)	Teneur maximum (mg/kg)
strontium	205	1 118
baryum	32	236
zirconium	29	76
titane	26	470
zinc	4,0	107
chrome	1,6	75

manganèse	3,5	20
cuivre	2,0	195
vanadium	2,0	20
nickel	1,7	250
arsenic	1,3	42
cadmium	0,8	25
sélénium	0,5	24
plomb	0,5	17
uranium	0,5	6,8
argent	0,4	5,0
thorium	0,4	3,6
cobalt	0,05	2,3
mercure	0,005	10

Tableau 2 : Teneurs en métaux lourds dans le phosphogypse [Colombel, 1978a ; Schaeffner, 1978 ; Simon, 1990 ; Abdel-Moneim, 1993 ; SNC-Lavalin, 1993 ; Arocena et al., 1995 ; Burnett et al., 1995 ; Rutherford et al., 1996 ; Battelle, 1999]

4 - Activité radioactive du phosphogypse

Les minerais de phosphate naturel utilisés pour la fabrication de l'acide phosphorique contiennent également des traces d'éléments radioactifs d'origine naturelle. Ainsi, le minerai moyen de phosphate marocain contient entre 100 et 130 g d'uranium par tonne de minerai, et le minerai moyen de phosphate de Floride entre 100 et 180 g/t [Moisset, 1980]. Ces radio-éléments peuvent se retrouver pour partie dans le phosphogypse, comme l'indique le Tableau 3 qui fournit l'activité radioactive (en Becquerel [\[NCI4\]](#) par unité de masse) des différents radio-éléments pour le minerai de phosphate et pour le phosphogypse.

La fraction fine du phosphogypse a tendance à concentrer les impuretés puisqu'il est possible d'y trouver jusqu'à 6 070 Bq/kg de ²²⁶Ra ou bien encore jusqu'à 6 280 Bq/kg de ²¹⁰Pb [Rutherford et al., 1996].

A titre de comparaison, l'activité radioactive d'un sol granitique naturel est d'environ 8 000 Bq/kg.

Le Tableau 3 confirme les conclusions de Kouloheris [1980] [\[NCI5\]](#) et de Berish [1990], selon lesquelles l'uranium naturellement contenu dans le minerai de phosphate demeurerait en règle générale dans l'acide phosphorique produit, alors que le radium tendrait à se concentrer dans le phosphogypse.

Radio-élément	Concentration dans le minerai de phosphate (Bq/kg)	Concentration dans le phosphogypse (Bq/kg)
radium 226	40 à 5 022	52 à 3 219
plomb 210	240 à 1 835	250 à 1 833
polonium 210	238 à 1 835	355 à 1 765
thorium 230	867 à 1 957	90 à 513
uranium 234	985 à 2 183	68 à 470
uranium 238	90 à 4 800	23 à 468
thorium 232	11 à 622	2 à 39
protactinium 231	46	14
actinium 227	46	14
uranium 235	46	7
radium 228	30	24
thorium 228	30	9

Tableau 3 : Activité radioactive des radio-éléments contenus dans les minerais de phosphate et dans le phosphogypse [van der Heijde et al., 1988 ; Berish, 1990 ; Conklin, 1992 ; Burnett

et al., 1995 ; Rutherford et al., 1996 ; Scholten and Timmermans, 1996 ; Battelle, 1999 ; Mahjoubi et al., 2000]

Plus de détails : [activité](#) radioactive

Caractéristiques géotechniques

Sommaire :

1 - Le phosphogypse en tant que matériau de remblai

2 - Graves laitier activées au phosphogypse

3 - Cendres volantes traitées au phosphogypse

4 - Liants routiers à base de phosphogypse

Le phosphogypse a été utilisé seul en tant que remblai, ou bien a été ajouté ou substitué dans diverses formulations de matériaux servant en ingénierie routière [Ouzon et Makhoul, 1979] : graves laitiers, cendres volantes, graves ciment... Les caractéristiques et les formulations de ces matériaux ont été étudiées en laboratoire du point de vue géotechnique.

1 - Le phosphogypse en tant que matériau de remblai

Le comportement mécanique d'un remblai de phosphogypse peut s'assimiler à celui d'un ouvrage en sable, sans propriété plastique, propre, très friable, dont les grains se fragmenteraient sous des contraintes de quelques centaines de kPa seulement [[Schaeffner, 1978](#) ; [Vautrain et Gestin, 1978](#) ; Gorlé, 1985 ; Rouis, 1991].

Plus de détails : comportement mécanique d'un remblai de phosphogypse

Par ailleurs, le phosphogypse se caractérise par des hauteurs d'ascension capillaire importantes, et les percolations au sein d'un terril de phosphogypse en place sont importantes en raison d'un compactage faible.

Plus de détails : terril de phosphogypse

La masse volumique sèche du phosphogypse en place sur le terril varie de 0,85 à 1,5 g/cm³ ce qui ne permet pas d'envisager l'utilisation du phosphogypse, sans un véritable compactage préalable, pour des remblais devant supporter un trafic routier. Toutefois, la portance de ce matériau chute brusquement lorsqu'il s'approche de sa saturation, ce qui rend difficile son compactage.

Les différentes études menées aboutissent à déconseiller l'utilisation du phosphogypse en remblais routiers, essentiellement pour des raisons économiques : les méthodes permettant de rendre le phosphogypse apte à une utilisation en remblai routier s'avèrent en effet non compétitives comparées au recours à des matériaux plus traditionnels.

2 - Graves laitier activées au phosphogypse

L'utilisation de sables traités au laitier granulé et activés par de la chaux a été généralisée dans les années 1970, car ces matériaux étaient abondants, disponibles, faciles à mettre en œuvre, et ne nécessitaient pas de traitement. Par la suite, il s'est avéré que l'activation sulfatique procurait aux mélanges des performances nettement supérieures à celles obtenues par activation calcique [[Colombel, 1978a](#)].

Plus de détails : sables traités au laitier granulé

	Graves témoins (à la chaux ou à la soude)	Graves activées au phosphogypse et à la soude	Graves activées au phosphogypse et à la chaux
Formulation ⁽¹⁾			
Chaux (%)	0,5 à 1,0		0,15 à 0,8
Soude (%)	0,15 à 0,25	0,05 à 0,25	
Phosphogypse (%)		0,5 à 10	1,0 à 5,0
Résistance à la compression à 7 jours (MPa)	0 ⁽²⁾ à 2,3	0,1 à 7,3	0,1 à 2,2
Résistance à la compression à 180 jours (MPa)	0 ⁽²⁾ à 7,7	2,6 à 27,9	0,5 à 8,3

Résistance à la traction à 180 jours (MPa)	0 ⁽²⁾ à 0,8	0,5 à 2,0	0,2 à 0,9
Module élastique en compression à 7 jours (GPa)	0 ⁽²⁾ à 14,0	3,4 à 24,5	1,0 à 10,5
Module élastique en compression à 180 jours (GPa)	0 ⁽²⁾ à 26,4	8,7 à 46,7	7,4 à 31,4
Module élastique en traction à 180 jours (GPa)	0 ⁽²⁾ à 22,0	8,0 à 34,5	8,5 à 24,3

Tableau 4 : Caractéristiques mécaniques de graves laitier activées par du phosphogypse, et de la chaux ou de la soude [Astesan, 1978 ; Colombel, 1978a, 1978b]

(1) Pour la formulation des graves laitier, les dosages en phosphogypse, chaux et soude sont exprimés par rapport au poids total de grave et de laitier.

(2) Ce résultat correspond à une absence de prise de l'échantillon témoin.

[Plus de détails : Graves activées au phosphogypse et à la soude](#)

[Plus de détails : Graves activées au phosphogypse et à la chaux](#)

L'utilisation du phosphogypse comme activant sulfatique du laitier granulé a été envisagée comme une filière possible de valorisation de ce déchet. Cette activation étant cependant plus lente que l'activation calcique ou sodique, des études ont porté sur la recherche d'un activant mixte phosphogypse/soude ou phosphogypse/chaux, qui permettrait une prise suffisante à court terme grâce à la soude et une croissance des résistances à long terme grâce aux sulfates contenus dans le phosphogypse [Colombel, 1978a].

Le Tableau 4 présente les mesures de caractéristiques mécaniques associées à plusieurs formulations de graves laitier activées par du phosphogypse et de la soude ou de la chaux. Pour toutes les formulations, la teneur en eau optimale, déterminée par l'essai Proctor modifié [NC16], a été adoptée : elle varie de 5,5 à 7,0% selon les matériaux.

Pour les graves laitier activées au phosphogypse et à la soude, leurs performances mécaniques sont à quelques exceptions près toujours supérieures à celles des graves laitier témoins (qui n'utilisent pas de phosphogypse dans leur formulation), que ce soit aux jeunes âges ou bien à long terme. Pour les graves laitier à base de mélange phosphogypse/chaux, les résultats obtenus sont globalement décevants, et dans quelques cas seulement comparables aux performances d'une grave laitier témoin.

[Plus de détails : graves laitier à base de mélange phosphogypse/chaux,](#)

3 - Cendres volantes traitées au phosphogypse

Depuis la fin des années 1960, les cendres volantes de centrales thermiques sont associées avec de la chaux et du gypse pour former un mélange « tout cendres », sans granulats, utilisé en couche de fondation. Le remplacement du gypse naturel par du phosphogypse a été envisagé pour former ce mélange « tout cendres ».

[Plus de détails : cendres volantes de centrales thermiques](#)

Le Tableau 5 donne les résistances à la compression de diverses formulations de cendres volantes traitées avec du phosphogypse et de la chaux, et les compare à des cendres volantes traitées plus classiquement avec 7% de ciment.

	Cendres témoins (traitées avec 7% de ciment)	Cendres traitées à la chaux et au phosphogypse
Formulation ⁽¹⁾		
Chaux (%)		5,0 à 30,0
Phosphogypse (%)		0,0 à 43,0
Résistance à la compression à 7 jours (MPa)	5,4	0,7 à 4,1
Résistance à la compression à 180 jours (MPa)	9,1	8,0 à 33,9

Tableau 5 : Résistances à la compression à 7 et 180 jours pour des cendres volantes traitées à la chaux et au phosphogypse [Andrieux et al., 1978]

(¹) Pour la formulation des cendres volantes, les dosages en chaux et phosphogypse sont exprimés par rapport au poids total de cendres volantes et de chaux.

Si les performances au jeune âge sont moindres pour les cendres volantes traitées avec un mélange phosphogypse/chaux que pour celles traitées au ciment, le phénomène s'inverse avec le vieillissement des matériaux (les effets étant visibles à 180 jours). Le dosage en phosphogypse semble n'avoir que peu d'influence sur les caractéristiques mécaniques, alors que les variations du dosage en chaux influent significativement sur la résistance à la compression [Andrieux et al., 1978].

Des essais mécaniques ont aussi été réalisés en laboratoire, sur des éprouvettes, pour un mélange de 95% de cendres volantes, 5% de chaux et 5% de phosphogypse (le dosage de phosphogypse s'entendant par rapport au poids total de cendres volantes et de chaux) [Andrieux et al., 1978]. Les résultats sont très dispersés. Néanmoins les deux valeurs suivantes sont proposées : résistance à la traction par flexion proche de 1,7 MPa et module d'Young [NCI7] d'environ 10 GPa. Les auteurs attribuent la dispersion des résultats aux amorces de rupture qui résulteraient du compactage du matériau.

Un mélange à 75% de cendres volantes, 15% de chaux éteinte et 10% de phosphogypse offre la résistance à la compression à 360 jours la plus élevée : 35 MPa.

4 - Liants routiers à base de phosphogypse

Dans cette filière de valorisation, le phosphogypse a été envisagé comme constituant d'un liant routier constitué par un mélange de laitier granulé, de phosphogypse et de soude, et permettant la réalisation d'un « ciment » routier sans clinker. Des essais en laboratoire ont porté sur plusieurs formulations de liants routiers pour déterminer les proportions en produits qui donnaient les meilleurs résultats [Raverdy, 1978]. Plusieurs finesses différentes de laitier ont également été testées, de 2 000 cm²/g à 4 000 cm²/g. Les performances des différents mélanges ont été comparées à celles d'un ciment traditionnel de type CPA 400.

Plus de détails : laitier granulé

	Liants témoins (ciment de type CPA 400)	Liants à base de laitiers et de phosphogypse
Formulation (¹)		
Soude (%)		0,5 à 1,0
Phosphogypse (%)		0,0 à 50,0
Résistance à la flexion à 7 jours (MPa)	7,1	3,9 à 6,6
Résistance à la flexion à 180 jours (MPa)	9,4	4,6 à 9,5
Résistance à la compression à 7 jours (MPa)	41,6	12,8 à 37,2
Résistance à la compression à 180 jours (MPa)	54,4	23,1 à 72,5
Retrait hydraulique à 28 jours (µm/m)	690	473 à 2 000
Gonflement à 28 jours (µm/m)	148	69 à 655

Tableau 6 : Caractéristiques mécaniques de liants routiers à base de laitiers et de phosphogypse [Raverdy, 1978]

(¹) Pour la formulation des liants routiers, les dosages en phosphogypse et soude sont exprimés par rapport au poids total de laitier et de phosphogypse.

Plus de détails : Liants à base de laitiers et de phosphogypse

Le Tableau 6 présente plusieurs caractéristiques mécaniques de ces liants routiers, évaluées sur des éprouvettes prismatiques de mortier au 1/3 conformément à la norme AFNOR P 15- 451.

De façon générale, les résistances à la flexion des liants à base de laitiers et de phosphogypse sont inférieures à celles d'un ciment CPA 400. Les meilleures résistances à la flexion sont obtenues pour les laitiers les plus fins (4 000 cm²/g), pour un dosage en phosphogypse de 20%, et pour 0,5% de soude. Les résistances à la flexion les plus faibles correspondent aux laitiers les moins fins (2 000 cm²/g) et aux dosages « extrêmes » de phosphogypse (5 ou 50%).

La plupart des formulations testées présentent des valeurs de *retrait hydraulique* à 28 jours qui dépassent largement la limite des 800 µm/m. Les retraits les moins importants correspondent aux dosages les plus faibles en phosphogypse (de 5 à 20%) et aux laitiers les plus finement broyés. En ce qui concerne les valeurs de *gonflement*, la limite de 250 µm/m est dépassée pour les laitiers les plus fins et contenant le plus de phosphogypse.

En conclusion, un mélange à 20% de phosphogypse, avec un laitier fin (de 3 000 cm²/g à 4 000 cm²/g) et 0,5% de soude, présenterait des caractéristiques satisfaisantes pour faire un liant routier.

Caractéristiques environnementales

Sommaire :

- 1 - Transferts vers les eaux
- 2 - Transferts vers l'atmosphère

1 - Transferts vers les eaux

Avant que la mise en terril ne soit adoptée de façon quasi généralisée, l'usage était de rejeter le phosphogypse sous forme d'eau gypseuse, c'est à dire mélangé à de l'eau de mer, dans le milieu marin (cf. origine, formation et élaboration). Ce mélange pouvait être stocké provisoirement dans des bacs pour faciliter le rejet ultérieur en mer. Cette eau gypseuse, dont la phase liquide est analogue à un lixiviat de phosphogypse, a fait l'objet d'analyses. La composition typique des phases solide et liquide d'une eau gypseuse est donnée dans le Tableau 7.

Une eau gypseuse contenant de l'ordre de 20%, en poids, de phosphogypse a un pH acide de l'ordre de 2,4 et s'avèrent fortement chargées en strontium, baryum, cobalt, nickel, zinc, manganèse, et cadmium. Des essais de lixiviation de phosphogypse portant uniquement sur l'étude du radium ont permis de déterminer que la teneur en ²²⁶Ra dans un éluat de phosphogypse varie entre 0,07 et 0,53 Bq/l [Haridasan *et al.*, 2002].

Une autre façon d'évaluer les transferts potentiels vers les eaux est de réaliser des prélèvements d'eau dans une nappe située sous un terril de phosphogypse. Les concentrations en différents éléments au sein d'une nappe, exactement au droit d'un terril de phosphogypse sont globalement beaucoup plus importantes que celles rencontrées dans l'eau gypseuse [Rouis, 1991]. Cependant, à l'exception du cuivre, ces concentrations s'atténuent avec la distance au terril de phosphogypse. Globalement, la nappe est significativement polluée sur une distance de 100 mètres dans le sens de son écoulement, et sur une distance de 50 mètres dans les autres directions.

[Plus de détails : prélèvements d'eau dans une nappe sous un terril de phosphogypse](#)

[Plus de détails : terril de phosphogypse](#)

Les éléments transférés vers les eaux peuvent s'accumuler dans les sédiments, qui peuvent à leur tour relarguer ces éléments si une modification des conditions physico-chimiques intervient. Les concentrations dans les sédiments de cours d'eau en éléments solubles sont très dépendantes du pH et du potentiel redox de l'eau [Carbonell-Barrachina *et al.*, 2002]. Les relargages les plus importants se produisent en milieu acide.

	Elément	Phase solide phosphogypse sec	: Phase liquide : filtrat d'eau gypseuse
composition élémentaire	SO ₃	441 à 450 g/kg	1,55 à 2,90 g/l
	CaO	311 à 315 g/kg	1,01 à 1,80 g/l
	SiO ₂	14,0 g/kg	

	F	11,6 à 12,0 g/kg	0,12 à 2,10 g/l
	P ₂ O ₅	9,0 à 12,0 g/kg	0,14 à 1,37 g/l
	C organique	2,2 à 5,0 g/kg	
	Cl	0,3 à 4,5 g/kg	0,10 à 0,85 g/l
	MgO	0,5 à 3,0 g/kg	0,12 g/l
	Fe ₂ O ₃	0,4 à 1,0 g/kg	0,007 à 0,01 g/l
métaux lourds	strontium	1100 mg/kg	13 à 39 mg/l
	zinc	38 mg/kg	0,81 à 0,89 mg/l
	chrome	22 mg/kg	0,09 à 0,32 mg/l
	cadmium	15 à 18 mg/kg	0,12 à 0,20 mg/l
	cuiivre	14 mg/kg	0,06 à 0,16 mg/l
	vanadium	14 mg/kg	0,18 à 0,23 mg/l
	nickel	< 5 mg/kg	0,22 à 0,30 mg/l
	plomb	< 5 mg/kg	0,02 mg/l
	arsenic	< 5 mg/kg	0,006 à 0,013 mg/l

Tableau 7 : Composition typique et teneurs en métaux lourds des phases solide et liquide d'une « eau gypseuse » [Schaeffner, 1978 ; Ammar et al., 1991 ; SNC-Lavalin, 1993]

Des prélèvements d'eau dans des nappes souterraines à proximité de différents terrils de phosphogypse ont également été réalisés afin de mesurer les teneurs en radio-éléments qui auraient migré vers ces nappes [Burnett et al., 1995]. Le Tableau 8 présente les gammes de teneurs rencontrées en radio-éléments dans ces nappes.

Radio-élément	Teneur minimale (Bq/l)	Teneur maximale (Bq/l)
radium 226	5	1 132
radon 222	10	2 575
plomb 210	2	10 310
polonium 210	5	3 018

Tableau 8 : Analyses des radio-éléments contenus dans des nappes souterraines à proximité de terrils de phosphogypse [Burnett et al., 1995]

2 - Transferts vers l'atmosphère

Les mesures de transferts vers l'atmosphère à partir de phosphogypse ont été réalisées dans différents cadres : à partir de phosphogypse mis en terril, à partir de chaussées valorisant du phosphogypse, ou encore à partir d'usine de fabrication d'acide phosphorique. Pour les émissions de fluor dans l'atmosphère à partir d'un terril de phosphogypse, des mesures de flux de fluor ont été réalisées sur un terril de phosphogypse en Tunisie, et ont mis en évidence des émissions de fluor jusqu'à 20 kg/h, sans toutefois conclure quant à la nocivité potentielle de ces rejets atmosphériques [SNC-Lavalin, 1993].

[Plus de détails : émissions de fluor dans l'atmosphère à partir d'un terril de phosphogypse.](#)

Quant aux émissions de radon ²²²Rn dans l'atmosphère à partir de terrils de phosphogypse, elles sont très variables, d'un facteur 1 à 1 000. Une moyenne de flux de radon à partir de terrils de phosphogypse de l'ordre de 0,5 Bq/m²/s est proposée par Berish [1990]. La concentration en radon dans l'air consécutive à son émission dans l'atmosphère a été mesurée autour de terrils de phosphogypse. Elle est de l'ordre de 25 Bq/m³ à proximité immédiate du terril, et ne descend en dessous de la concentration de bruit de fond considérée en Floride, soit 5 Bq/m³, qu'à une distance de 1 km du terril [Berish, 1990].

[Plus de détails : émissions de radon ²²²Rn dans l'atmosphère](#)

[Plus de détails : terrils de phosphogypse](#)

Des flux de radon ont également été mesurés à partir de chaussées utilisant du phosphogypse, soit seul, soit stabilisé avec 6% de ciment, soit encore associé avec d'autres matériaux comme du sable, du gravier ou des éclats de granit, en proportions variables

[Roessler, 1990]. Les flux de radon varient de $3,7 \cdot 10^{-3}$ à $0,24 \text{ Bq/m}^2/\text{s}$, avec une moyenne de l'ordre de $0,04 \text{ Bq/m}^2/\text{s}$.

D'autres mesures ont permis d'évaluer les concentrations en radon dans l'air à l'intérieur et aux environs d'une usine de fabrication de fertilisants minéraux phosphatés [Mahjoubi *et al.*, 2000]. Ces concentrations varient de 23 Bq/m^3 , à une distance de 3 km des bâtiments de l'usine à moins de 400 Bq/m^3 à l'intérieur des bâtiments.

[Plus de détails : concentrations en radon dans l'air à l'intérieur et aux environs d'une usine de fabrication de fertilisants minéraux phosphatés](#)

Aspects sanitaires

Sommaire :

1 - Risques environnementaux

2 - Risques sanitaires hors radio-éléments

3 - Risques liés à une exposition aux radio-éléments

1 - Risques environnementaux

Même si les rejets de phosphogypse dans le milieu marin ont cessé, l'impact des anciens apports de pollutions diverses (sulfates, phosphore, fluor, métaux...) sur le milieu naturel persiste toujours.

1.1 - Impacts physiques

Le phosphogypse contient une fraction, de 1 à 5%, insoluble dans l'eau de mer, qui a sédimenté à proximité du rejet et a formé un dépôt. Le phosphogypse ayant des caractéristiques proches de celles du plâtre [NCI8], cette sédimentation a entraîné un colmatage du fond marin et une stérilisation locale affectant la *faune benthique*.

1.2 - Impacts chimiques

A l'époque où les rejets en mer ~~étaient encore en cours~~ ~~avaient encore lieu~~, les sédiments aux alentours de ces rejets de phosphogypse avaient des teneurs en sulfate comprises entre 10 et 300 g/kg, ce qui représentait une zone d'une dizaine d'hectares où la vie marine était très compromise [Simon, 1990]. Entre le début et la fin des déversements en mer, le cadmium contenu dans le phosphogypse s'est régulièrement accumulé dans les sédiments, jusqu'à atteindre des concentrations de l'ordre de 6 mg/kg [Simon, 1990]. Après la fin des rejets, les teneurs en sulfate et cadmium ont diminué, mais présentent des pics ponctuels lorsque les fonds marins sont agités [Simon et Sarthou, 1996]. Presque dix ans après la fin des rejets en mer, sur les anciennes zones de déversements, les teneurs en sulfates dans les sédiments peuvent encore dépasser la valeur de 1 g/kg [Simon *et al.*, 2000].

Sur le site de l'une des plus importantes mines de phosphate au monde, à Sfax en Tunisie, les teneurs en fluor dans l'eau de mer ont été mesurées à proximité des rejets marins de phosphogypse. Selon les auteurs, les teneurs en F^- varient entre 3 mg/l et 150 mg/l, et la zone d'influence des rejets entre moins de 1 kilomètre et 5 kilomètres [Darmoul, 1979 ; Ghannouchi, 1989].

1.3 - Impacts des radio-éléments

Les rejets de phosphogypse induisent une contamination du milieu récepteur (eaux de mer ou d'estuaire, matière en suspension, sédiments, faune marine...) par les radio-éléments qu'ils contiennent. Ainsi, à proximité de ces rejets, il est possible de relever les activités radioactives suivantes en ^{210}Po [Germain *et al.*, 1995] :

- de 2,5 à 16,3 mBq/l dans l'eau non filtrée (à comparer avec les activités de différentes eaux côtières comprises entre 0,1 et 4,0 mBq/l) ;
- de 130 à 179 Bq/kg (en poids sec) dans les matières en suspension ;
- de 75 à 1 058 Bq/kg (en poids sec) dans les sédiments ;
- de 130 à 350 Bq/kg (en poids sec) dans la chair de moules (à comparer aux valeurs de 80 à 550 Bq/kg observées au niveau de différents estuaires européens).

1.4 - Conséquences sur la faune locale

Un suivi régulier (avant, pendant et après les déversements de phosphogypse en mer) a permis de caractériser l'impact des rejets de phosphogypse sur la faune benthique de

l'estuaire de la Seine [Simon, 1990 ; Simon *et al.*, 2000]. Un effondrement de la faune benthique, tant en terme de nombre d'espèces recensées qu'en terme de nombre d'individus par m², a été constaté quelques années après le début des rejets en mer. Ainsi, sur une des stations de suivi, plus de 50 000 individus par m² appartenant à plus de 50 espèces différentes ont été recensées en 1980, contre 6 000 individus par m² représentant une trentaine d'espèces en 1989. Certaines campagnes de suivi ont même mis en évidence l'absence d'individus à proximité des rejets. Depuis l'arrêt des déversements, les peuplements restent pauvres : les populations benthiques perturbées par les rejets de phosphogypse n'ont toujours pas donné de véritables signes de reprise.

2 - Risques sanitaires hors radio-éléments

Il existe très peu de données relatives à la mise en évidence d'un risque lié à l'exposition aux substances contenues dans le phosphogypse.

Un calcul de risque sanitaire a été mené pour évaluer le risque de développement d'un cancer suite à une exposition à l'arsenic contenu dans un phosphogypse déposé en terril [Zakharova *et al.*, 2002]. Cette étude conclut, dans le cas particulier étudié, qu'il existe un niveau de risque non acceptable en particulier par les voies d'exposition « ingestion de produits agricoles » et « captage d'eau souterraine », un niveau de risque acceptable par les voies d'exposition « contact cutané », « ingestion de viande » et « ingestion directe de sol », et une absence de risque par les voies d'exposition « inhalation de poussières ».

[Plus de détails : risque de développement d'un cancer suite à une exposition à l'arsenic contenu dans un phosphogypse déposé en terril](#)

3 - Risques liés à une exposition aux radio-éléments

3.1 - Exposition sur les sites produisant du phosphogypse

Les émissions de radium ²²⁶Ra à partir des terrils de phosphogypse conduisent à des doses de radiation équivalentes comprises entre 0,32 et 0,42 µSv/h, ce qui signifie une exposition de 0,48 à 0,68 mSv par an [Laiche and Scott, 1991]. Selon les auteurs, ces résultats se traduisent par des risques négligeables sur la santé humaine pour des travailleurs affectés à l'exploitation d'un terril de phosphogypse. De fait, il est admis que le risque engendré par une exposition aux radio-éléments reste acceptable pour un taux d'exposition inférieur à 1 Sv par an [Scholten et Timmermans, 1996 ; Maison *et al.*, 2002].

[Plus de détails : doses de radiation équivalentes](#)

De même, l'exposition aux concentrations élevées en radon d'un travailleur dans une usine de fabrication de fertilisants ~~minéraux~~—phosphatés ne présenterait pas de risque inacceptable, à l'exception de travailleurs présents en permanence à proximité de filtres d'acide phosphorique défectueux pour lesquels un excès de risque individuel de 10⁻³ par année d'exposition a été calculé [Mahjoubi *et al.*, 2000].

[Plus de détails : l'exposition aux concentrations élevées en radon d'un travailleur dans une usine de fabrication de fertilisants minéraux phosphatés](#)

[Plus de détails : excès de risque individuel](#)

A l'inverse, des excès de risque individuel supérieurs à 10⁻⁵ (et qui ne seraient donc pas, dans la plupart des cas, considérés comme tolérables en France) ont été calculés pour une exposition au radon d'individus résidant à une distance entre 1 et 5 km d'un terril de phosphogypse [Berish, 1990]. En revanche, cette même étude estime que l'exposition aux poussières émises à partir d'un terril de phosphogypse et contenant des radio-éléments ne présenterait pas de risques inacceptables pour la santé humaine.

3.2 - Exposition sur les sites valorisant le phosphogypse

Une étude a calculé les risques sanitaires liés à l'exposition au radium ²²⁶Ra contenu dans un phosphogypse valorisé en infrastructures routières [Conklin, 1992].

[Plus de détails : risques sanitaires liés à l'exposition au radium ²²⁶Ra contenu dans un phosphogypse valorisé en infrastructures routières](#)

Cette étude a conduit l'Agence de Protection de l'Environnement des USA à interdire la valorisation du phosphogypse en infrastructures routières. Il est à noter d'une part que cette étude ne prend pas en compte les autres substances potentiellement dangereuses contenues dans le phosphogypse, et d'autre part que ces résultats ont fait l'objet d'une

critique selon laquelle les hypothèses, scénarios et données retenus auraient conduit à une majoration significative des risques [Johnson et Traub, 1996].

[Plus de détails : l'Agence de Protection de l'Environnement des USA \(lien ne marchant pas, adresse fautive ou site ayant changé\)](#)

3.3 - Exposition par la chaîne alimentaire

Les études de van der Heijde [1988] ont montré que, dans le cas de rejets de phosphogypse en mer, les humains sont exposés à ces radio-éléments par la consommation de divers produits pêchés sur les côtes tels que poissons, crustacés et coquillages. Cependant, elles ont également mis en évidence qu'un Hollandais moyen, consommant 6,3 kg de produits de la pêche par an, recevait par cette voie une dose de radiation équivalente de 0,6 μSv de ^{226}Ra et 20 μSv de ^{210}Po par année, ce qui ne représente qu'une contribution de l'ordre de 1% comparativement à la dose moyenne de radiation naturelle reçue en Hollande (1 700 μSv par an et par adulte).

[Plus de détails : dose de radiation équivalente](#)

Une étude a calculé les risques sanitaires liés à l'exposition au radium ^{226}Ra contenu dans un phosphogypse valorisé en agriculture [Conklin, 1992].

Cette étude a conduit l'Agence de Protection de l'Environnement des USA à interdire la valorisation du phosphogypse en agriculture. Comme pour le cas de la valorisation en infrastructures routières, cette étude ne prend pas en compte les autres substances potentiellement dangereuses contenues dans le phosphogypse, et a par ailleurs fait l'objet d'une critique visant à montrer le caractère majorant des hypothèses retenues [Johnson and Traub, 1996].

[Plus de détails : risques sanitaires liés à l'exposition au radium \$^{226}\text{Ra}\$ contenu dans un phosphogypse valorisé en agriculture](#)

Utilisation dans les infrastructures routières

Sommaire :

1 - Utilisation du phosphogypse en terrassement

2 - Utilisation du phosphogypse en assises de chaussées

1 - Utilisation du phosphogypse en terrassement

1.1 - Classification réglementaire des matériaux

D'après le guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme [LCPC et SETRA, 1992] et la norme NF P 11-300 relative à l'exécution des terrassements et à la classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières », le phosphogypse fait partie de la classe F « Sols organiques et sous-produits industriels », et plus précisément de la famille de matériaux F_5 « Phosphogypse ».

De ce matériau, il est précisé que son comportement géotechnique est comparable à celui d'un sable fin anguleux, très propre mais très friable. A cause des risques de formation d'ettringite ou de dissolution, il est mentionné que son utilisation à proximité d'ouvrages en béton, en arase terrassement ou dans les parties de remblai situées en zones inondables est en général à proscrire.

La famille de matériaux F_5 comporte quatre sous-classes : F_{51h} , F_{51m} , F_{51s} et F_{52} .

[Plus de détails : classes : \$F_{51h}\$, \$F_{51m}\$, \$F_{51s}\$ et \$F_{52}\$.](#)

Les sous-classes de matériaux F_{51h} , F_{51m} et F_{51s} font référence à du phosphogypse grossier neutralisé chimiquement par de la chaux. Elles peuvent être utilisées en remblai, avec certaines restrictions portant notamment sur l'intensité d'éventuelles pluies lors de la mise en remblai, la hauteur de remblai, le recours ou non à un arrosage complémentaire, l'épaisseur des couches de régalaage, l'intensité du compactage...

La sous-classe F_{52} est relative au phosphogypse fin et au phosphogypse grossier non neutralisé chimiquement par de la chaux. Il est explicitement recommandé de ne pas utiliser ces types de matériaux en remblai [LCPC et SETRA, 1992].

1.2 - Etude de remblais expérimentaux

L'étude d'un remblai expérimental à Thumeries (Nord), devant servir de support à une chaussée accueillant un trafic lourd, a permis de mettre en évidence les phénomènes suivants [[Schaeffner, 1978](#)] :

- les variations de teneur en eau étaient très rapides, que ce soit lors de l'imbibition ou bien lors du séchage ;
- les mesures de masses volumiques apparentes étaient très dispersées et le compactage n'était pas homogène ;
- aucun tassement significatif n'a été détecté pendant les quatre mois qui ont suivi la mise en œuvre du remblai ;
- un réseau de fissures, déjà visible seulement 24 heures après la mise en œuvre, s'est considérablement développé (jusqu'à 2 cm de large en 6 mois) ;
- une croûte de surface s'est formée qui, même peu résistante, empêchait le ravinement du matériau lors de précipitations intenses.

Plus de détails : remblai expérimental à Thumeries

Une des recommandations de cette étude était de recourir à la fraction la plus grossière du phosphogypse, et d'imperméabiliser les surfaces devant rester à l'air libre pendant plusieurs jours, par exemple avec un enduit bicouche. Compte-tenu de sa très grande sensibilité à l'eau, l'utilisation du phosphogypse est à proscrire dans les zones sujettes à inondation ou à forte remontée capillaire.

D'autres études sur des remblais expérimentaux, de dimensions plus réduites, ont confirmé ces conclusions [Quibel, 1978]. Notamment, la teneur en eau d'un remblai de phosphogypse devrait être maintenue en dessous de sa valeur à l'optimum Proctor. La mise en œuvre du remblai nécessite des couches de faible épaisseur, des rouleaux lourds et un nombre de passages élevé par rapport à des matériaux plus traditionnels. Cette étude insistait à nouveau sur la nécessité de protéger la partie supérieure du remblai afin de parvenir plus facilement à un profil d'équilibre des teneurs en eau.

1.3 - Utilisation du phosphogypse en accotement

L'avantage d'utiliser le phosphogypse en accotement, voire en terre-pleins centraux d'autoroutes, est que ces structures sont moins sollicitées mécaniquement. C'est pourquoi un accotement expérimental de phosphogypse a été réalisé sur la route nationale 28 près de Neufchâtel-en-Bray (Seine-Maritime) pour évaluer la faisabilité d'une telle valorisation [[Puiatti et Vigea, 1978](#)].

L'emploi du phosphogypse en accotement s'est avéré être soumis aux mêmes précautions que son emploi en remblai. De plus, il imposait de nombreuses contraintes tout au long du chantier. Ainsi, le transport du phosphogypse par camions bâchés était une nécessité pour éviter le dessèchement par le vent et la formation de poussières. Ce matériau n'était pas adapté à un déchargement classique par l'arrière d'un camion, car son écoulement était très difficile et le camion était obligé d'occuper toute une voie de la chaussée. Le recours à des camions tri bennes avec déchargement latéral était alors conseillé.

Par ailleurs, lors d'un tel chantier, le déversement de phosphogypse sur la chaussée était inévitable. En l'absence de nettoyage de cette chaussée, les véhicules amenés à y circuler soulevaient un nuage de phosphogypse sec en suspension dans l'air, à la fois dangereux sur le plan sanitaire et sur le plan de la sécurité routière. Un balayage mécanique d'une chaussée souillée par un tel dépôt de phosphogypse n'a pas été efficace à 100%, et il a fallu attendre l'action conjuguée du vent et de la pluie pour nettoyer réellement la chaussée.

1.4 - Utilisation du phosphogypse en couche de forme

Pour tenter de conférer au phosphogypse une insensibilité durable à l'eau et de limiter le phénomène de fissuration, un traitement de ce matériau avec du ciment a été envisagé pour la réalisation d'une couche de forme [Puiatti, 1978]. Il en est ressorti qu'un dosage faible (inférieur à 5%) en ciment ne jouait qu'un rôle de correcteur granulométrique sans amélioration des performances. Un dosage minimal de 7% de ciment était préconisé.

Dans ces conditions, les performances mécaniques de la couche de forme se développaient lentement, ce qui a conduit l'auteur de l'étude à recommander l'interdiction de la circulation pendant 14 jours après le traitement. Parmi les autres recommandations, un compactage et une teneur en eau proches des valeurs de l'optimum Proctor modifié devraient être

recherchés. Par ailleurs, traité avec du ciment, le phosphogypse se révélerait être un matériau particulièrement gélif, pour lequel les performances mécaniques chuteraient de moitié pour un seul cycle gel/dégel.

2 - Utilisation du phosphogypse en assises de chaussées

2.1 - Technique de la grave laitier

Une étude expérimentale d'une grave laitier activée au phosphogypse et à la soude a permis de tester en couche d'assise une formulation à 85% de grave, 15% de laitier, 8% de phosphogypse, et 0,2% de soude [Colombel, 1978a].

Plus de détails : étude expérimentale d'une grave laitier activée au phosphogypse et à la soude

Les caractéristiques mécaniques statiques mesurées lors de cette expérimentation en semi-vraie grandeur ont confirmé les résultats obtenus en laboratoire (cf. Tableau 4) : le matériau testé possédait de bonnes performances. Les autres caractéristiques évaluées (déflexion [\[NC19\]](#) sous un essieu type de 13 tonnes, vitesses de Rayleigh [\[NC110\]](#), modules d'élasticité dynamique [\[NC111\]](#)) étaient conformes à celles obtenues avec des graves traitées classiques.

En conclusion, l'utilisation du phosphogypse en tant que liant supplémentaire de la grave laitier activée à la soude s'avère possible. Elle permettrait même de valoriser des granulats ou des laitiers qui seraient mal considérés pour une activation à la soude seule.

2.2 - Technique des cendres volantes

Lors d'une étude expérimentale d'un mélange cendres volantes / phosphogypse / chaux en couche de fondation sur des routes et autoroutes à fort trafic, une auscultation des ces tronçons a été réalisée 3 à 5 ans après leur mise en œuvre [Andrieux *et al.*, 1978].

Plus de détails : étude expérimentale d'un mélange cendres volantes / phosphogypse / chaux

Sur les 140 carottes prélevées, 95% se trouvaient en excellent état, du point de vue de la résistance à la traction et de l'état de cohésion. Les conclusions de cette étude sont de recommander lors du recours à un mélange ternaire cendres volantes / chaux / phosphogypse :

- la réalisation d'une étude préalable lorsque les cendres volantes et le phosphogypse sont de qualité inconnue ;
- la surveillance de la fabrication et de la mise en œuvre ;
- la réalisation d'études systématiques de gonflement en immersion.

2.3 - Technique des graves ciment

Aucune étude à une échelle satisfaisante n'a été recensée, validant l'emploi du phosphogypse dans les liants routiers.

Sources sur le territoire français

A la fin des années 1970, il existait plusieurs unités de fabrication des fertilisants minéraux phosphatés à travers la France, qui produisaient 7,5 millions de tonnes de phosphogypse par an [Mangin, 1978]. Cette production était principalement située en Seine-Maritime, sur les communes de Le Grand-Quevilly, Grand-Couronne et Le Havre. A cette époque, ces trois usines produisaient environ 6 millions de tonnes de phosphogypse par an, ce qui était du même ordre de grandeur que la production française annuelle de [gypse naturel](#) [Wenk and Henkels, 1982 ; Wirsching, 1991].

En 1992, il ne restait plus qu'une seule grande usine de fabrication de fertilisants minéraux phosphatés : celle de Le Grand-Quevilly, près de Rouen, exploitée par Grande-Paroisse, filiale à l'époque de la société Elf Atochem. Sa production totale de phosphogypse était de l'ordre de 1 million de tonnes par an [Savostianoff et Didier, 1993].

Au début des années 1990, la consommation de fertilisants minéraux phosphatés a connu une crise, en partie au profit des fertilisants azotés, et sa production a baissé [Savostianoff, 1993]. A ce phénomène conjoncturel s'ajoute la tendance actuelle consistant à privilégier la production de fertilisants minéraux phosphatés sur les lieux mêmes d'extraction des minerais de fluorapatite. Les principaux gisements exploités par les entreprises françaises sont ceux

situés au Maroc, en Algérie et en Tunisie (la production de phosphogypse en Tunisie par exemple dépasse maintenant largement celle de la France avec 10 millions de tonnes par an [Sfar Felfoul *et al.*, 2001]). La production de phosphogypse tend donc à décroître régulièrement sur le territoire français.

A ce jour, l'usine de Le Grand-Quevilly est toujours exploitée par Grande Paroisse, maintenant filiale de la société Atofina. Sa production est de 880 000 tonnes par an. Le stock cumulé de phosphogypse en France est estimé à 16 millions de tonnes.

Emplois répertoriés

L'emploi de phosphogypse en infrastructures routières en France remonte à la fin des années 1970 et a été très limité (cf. [Utilisation dans les infrastructures routières](#)). Le devenir à long terme de ces quelques kilomètres plus ou moins expérimentaux n'est pas documenté. Il semblerait qu'aucun autre emploi n'ait été envisagé depuis.

Aux Etats-Unis, près de 700 réalisations réussies, impliquant des mélanges de phosphogypse/ciment ou phosphogypse/cendres volantes, auraient été répertoriées [Saylak, 1995] : voies urbaines, terminaux de camions, parkings résidentiels ou commerciaux, plate-formes de chargement. En revanche, il est reporté que les tentatives d'emploi du phosphogypse pour des infrastructures de plus grande envergure (routes sous la responsabilité des Etats ou de la Fédération) se sont soldées par des échecs.

Les principales causes identifiées pour expliquer ces échecs sont [Saylak, 1995] :

- un excès d'humidité pendant la construction, qui affaiblit la fondation pendant la période la plus critique du développement des résistances mécaniques ;
- la stabilisation lente des mélanges phosphogypse/ciment, qui empêche d'atteindre les résistances mécaniques suffisantes dans les délais requis, ou qui implique l'emploi de stabilisateurs ;
- un mélange insuffisamment homogène, engendrant des défauts qui ne se manifestent que lorsque l'infrastructure est ouverte à la circulation ;
- l'emploi de stabilisateurs ou d'enduits incompatibles avec la présence de sulfates dans le phosphogypse ;
- un compactage insuffisant entraînant des résistances mécaniques insuffisantes ;
- une ouverture anticipée à la circulation.

Recherches en cours

Selon les données recueillies à ce jour dans le cadre ~~de l'Observatoire Français du Recyclage d'Ofrijr~~ dans les Infrastructures Routières, aucune recherche n'est actuellement en cours en France sur la caractérisation ou la valorisation du phosphogypse (en ingénierie routière ou dans d'autres filières). Il convient toutefois de noter qu'il existe un suivi régulier de l'impact des anciens rejets de phosphogypse dans l'estuaire de la Seine [Simon *et al.*, 2000]. Au niveau mondial, il est possible de classer les études existantes en deux grandes catégories, aux préoccupations totalement différentes :

- les études portant sur le développement de techniques viables de valorisation du phosphogypse dans le ciment [Demirbas, 1996 ; Smadi *et al.*, 1999 ; Charfi Fourati *et al.*, 2000 ; Öztürk *et al.*, 2000 ; Singh, 2000 ; Singh and Garg, 2000 ; Potgieter and Howell-Potgieter, 2001 ; Singh, 2002] ou dans la brique [Garg *et al.*, 1996 ; Kumar, 2000 ; Kumar, 2003] ;
- les études portant sur les caractéristiques environnementales du phosphogypse, et en particulier ses teneurs en radon [Burnett *et al.*, 1995 ; Rutherford *et al.*, 1996 ; Scholten and Timmermans, 1996 ; Mahjoubi *et al.*, 2000 ; Haridasan *et al.*, 2002].

Bibliographie[NCl121](#)

- Abdel-Moneim Ayadi, 1993. Elimination du cadmium dans l'acide phosphorique. *Informations Chimie*, vol. **345**, pp. 66-67.
- Ammar E., Sassadate K., Bouzid J., Sato H., Lasrem A., Medhioub K., 1991. Impact des rejets industriels du complexe chimique de Gabès sur l'environnement marin. In *Symposium International sur la Géologie Urbaine*: Sfax (Tunisie), pp. 348-359.
- Andrieux P., Bivert B., Dron R., 1978. Utilisation du phosphogypse en assises de chaussée. In LCPC, ed., *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, numéro spécial VII "Le phosphogypse ; utilisation d'un sous-produit industriel en technique routière"*, Chapitre III, 54-68.
- Arocena J. M., Rutherford P. M., Dudas M. J., 1995. Heterogeneous distribution of trace elements and fluorine in phosphogypsum by-product. *The Science of the Total Environment*, vol. **162**, pp. 149-160.
- Astesan A., 1978. Activation par le gypsonat de sables traités au laitier granulé. In LCPC, ed., *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, numéro spécial VII "Le phosphogypse ; utilisation d'un sous-produit industriel en technique routière"*, Chapitre II.2, 44-49.
- Battelle Memorial Institute, 1999. *Background report on fertilizer use, contaminants and regulations*. Technical report n° 747-R-98-003, U. S. Environmental Protection Agency: Washington (USA), 131 pages.
- Berish C. W., 1990. Potential environmental hazards of phosphogypsum storage in central Florida. In Chang W. F., ed., *Proceedings of the third International Symposium on Phosphogypsum*: Orlando (USA). Publication n° 01-060-083, Florida Institute of Phosphate Research: Bartow (USA), volume I, pp. 1-29.
- Burnett William C., Cowart James B., LaRock Paul, Hull Carter D., 1995. *Microbiology and radiochemistry of phosphogypsum*. Technical report n° 05-035-115, Florida Institute of Phosphate Research: Bartow (USA), 225 pages.
- Carbonell-Barrachina A., DeLaune R. D., Jugsujinda A., 2002. Phosphogypsum chemistry under highly anoxic conditions. *Waste Management*, vol. **22**, pp. 657-665.
- Charfi Fourati Faouzia, Bouaziz Jamel, Belayouni Habib, 2000. Valorisation du phosphogypse de Tunisie en vue de son utilisation comme substituant au gypse naturel dans la fabrication du ciment. *Déchets, Sciences et Techniques*, vol. **20**, pp. 24-32.
- [Colombel J.-H., 1978a. Utilisation](#) du phosphogypse en assises traitées aux liants hydrauliques. In LCPC, ed., *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, numéro spécial VII "Le phosphogypse ; utilisation d'un sous-produit industriel en technique routière"*, Chapitre II.1, 16-43.
- [Colombel J.-H., 1978b. Etude d'une grave-laitier](#) activée au gypsonat. In LCPC, ed., *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, numéro spécial VII "Le phosphogypse ; utilisation d'un sous-produit industriel en technique routière"*, Chapitre II.3, 50-53.
- Conklin Craig, 1992. *Potential uses of phosphogypsum and associated risks; background information document*. Technical report n° 402-R-92-002, U. S. Environmental Protection Agency: Washington (USA), 124 pages.
- Daligand Daniel, 2002. Plâtre. In *Techniques de l'Ingénieur*, volume "Traité de Construction", réf. **CA** (C910), 16 pages.
- Darmoul B., 1979. *Recherches sur la pollution du golfe de Gabès par les rejets d'industries chimiques. Etude expérimentale de la toxicité du phosphogypse*. Thèse de doctorat, spécialité Océanographie et biologie marine, Faculté des Sciences de Tunis: Tunis (Tunisie), 135 pages.
- Davister A., 1998. Phosphogypsum: a waste (more or less harmful) or a ressource ? In *IFA Technical Conference*: Marrakech.
- D'Avout d'Auerstaedt L., 1976. Utilisation d'un déchet industriel modifié dans les travaux routiers : phosphogypse et gypse sodé. *Nuisances et Environnement*, vol. **51**, pp. 39-40.
- Demirbas Ayhan, 1996. Optimizing the physical and technological properties of cement additives in concrete mixtures. *Cement and Concrete Research*, vol. **26** (11), pp. 1737-1744.

- Garg Mridul, Singh Manjit, Kumar Rakesh, 1996. Some aspects of the durability of a phosphogypsum - lime - fly ash binder. *Construction and Building Materials*, vol. **10** (4), pp. 273-279.
- Germain P., Leclerc G., Simon Serge, 1995. Transfer of polonium-210 into *Mytilus edulis* (L.) and *Fucus vesiculosus* (L.) from the baie de Seine (Channel coast of France). *The Science of the Total Environment*, vol. **164** (2), pp. 109-123.
- Ghafoori Nader, Chang Wen F., 1986. Engineering characteristics of dihydrate phosphogypsum-based concrete. In Lloyd Jr. G. M., ed., *Proceedings of the third workshop on by-products of phosphate industries*: Tampa (USA). Publication n° 01-031-046, Florida Institute of Phosphate Research: Bartow (USA), pp. 185-210.
- Ghannouchi Rachid, 1989. *Diagnostic de la pollution des eaux du golfe de Gabès par le complexe chimique. Proposition d'un traitement*. Mémoire, Institut National Polytechnique de Lorraine: Vandoeuvre (France).
- Gorlé D., 1985. *Le phosphogypse comme matériau de remblai routier*. Rapport technique n° CR 28/85, Centre de Recherches Routières: Bruxelles (Belgique), 187 pages.
- Haridasan P. P., Maniyan C. G., Pillai P. M. B., Khan A. H., 2002. Dissolution characteristics of ²²⁶Ra from phosphogypsum. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. **62**, pp. 287-294.
- Hudson Robert B., Dolan Michael J., eds., 1982. Phosphoric acids and phosphates. In Grayson M. and Eckroth D., eds., *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. John Wiley & Sons: New York (USA), vol. 17, third edition, pp. 426-472.
- Johnson J. R., Traub R. J., 1996. *Risk estimates for uses of phosphogypsum*. Technical report n° 05-041-124, Florida Institute of Phosphate Research: Bartow (USA), 17 pages.
- Kongshaug Gunnar, Brentnall Bernard A., Chassey Keith, Gregersen Jan-Helge, Stokka Per, Persson Bjørn, Kolmeijer Nick W., Conradsen Arne, Legard Torbjørn, Munk Harald, Skauli Øyvind, eds., 1991. Phosphate fertilizers. In Elvers B., Hawkins S. and Schulz G., eds., *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. VCH: New York (USA), vol. A19, fifth edition, pp. 421-463.
- Kouloheris A. P., 1980. Chemical nature of phosphogypsum as produced by various wet phosphoric acid process. In Borris D. P. and Boody P. W., eds., *PHOSPHOGYPSUM, Proceedings of the International Symposium on Phosphogypsum: utilization and/or disposal of phosphogypsum; potential barriers to utilization*: Lake Buena Vista (USA). Publication n° 01-001-017, Florida Institute of Phosphate Research: Bartow (USA), reprinted 1987, pp. 7-33.
- Kumar S., 2000. Fly ash - lime - phosphogypsum cementitious binder: a new trend in bricks. *Materials and Structures*, vol. **33**, pp. 59-64.
- Kumar Sunil, 2003. Fly ash / lime / phosphogypsum hollow blocks for walls and partitions. *Building and Environment*, vol. **38**, pp. 291-295.
- Laiche T. P., Scott L. M., 1991. A radiological evaluation of phosphogypsum. *Health Physics*, vol. **60** (5), pp. 691-693.
- Larousse Grand Dictionnaire Encyclopédique, 1984. Librairie Larousse: Paris (France), vol. 11, p. 8080.
- LCPC, SETRA, 1992. *Réalisation des remblais et des couches de forme ; guide technique*. SETRA: Bagnaux (France), vol. II : annexes techniques.
- Lin Kuo-Ting, Nanni Antonio, Chang Wen F., 1986. Engineering properties of dihydrate phosphogypsum, portland cement and fine aggregate mixtures. In Lloyd Jr. G. M., ed., *Proceedings of the third workshop on by-products of phosphate industries*: Tampa (USA). Publication n° 01-031-046, Florida Institute of Phosphate Research: Bartow (USA), pp. 161-184.
- Mahjoubi H., Charfi A. H., Labidi S., Chahed N., Mtimet S., 2000. Estimation des expositions associées à la présence du radon 222 dans les usines de traitement de phosphates et leurs environnements en Tunisie. *Radioprotection*, vol. **35** (2), pp. 201-215.
- Maison Annabel, Héry Michel, Mouton Claude, 2002. *Protection des travailleurs sur les chantiers de réhabilitation de sites industriels pollués*. Publication n° ED 866, INRS: Paris (France), 209 pages.

- [Mangin S., 1978. Généralités.](#) In LCPC, ed., *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, numéro spécial VII "Le phosphogypse ; utilisation d'un sous-produit industriel en technique routière"*, Chapitre I, 7-13.
- Moisset Jacques, 1980. Radium removal from phosphogypsum. In Borris D. P., Boody P. W., eds., *PHOSPHOGYPSUM, Proceedings of the International Symposium on Phosphogypsum: utilization and/or disposal of phosphogypsum; potential barriers to utilization*: Lake Buena Vista (USA). Publication n° 01-001-017, Florida Institute of Phosphate Research: Bartow (USA), reprinted 1987, pp. 384-397.
- Ouzon Sam, Makhoul Bassem, 1979. Perspectives d'utilisation du phosphogypse, sous-produit de la fabrication de l'acide phosphorique. *Revue Générale des Routes et des Aérodrômes*, vol. **556**, pp. 71-80.
- Öztürk A., Suyadal Y., Oguz H., 2000. The formation of belite phase by using phosphogypsum and oil shale. *Cement and Concrete Research*, vol. **30**, pp. 967-971.
- Potgieter J. H., Howell-Potgieter S. S., 2001. A plant investigation into the use of treated phosphogypsum as a set-retarder in OPC and an OPC/fly ash blend. *Minerals Engineering*, vol. **14** (7), pp. 791-795.
- Puiatti D., 1978. Traitement du phosphogypse au ciment pour réutilisation en couche de forme. In LCPC, ed., *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, numéro spécial VII "Le phosphogypse ; utilisation d'un sous-produit industriel en technique routière"*, Chapitre VII.1, 123-131.
- [Puiatti D., Vigea G., 1978. Accotement expérimental en phosphogypse](#) sur la RN 28 près de Neufchâtel-en-Bray ; conditions de mise en œuvre. In LCPC, ed., *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, numéro spécial VII "Le phosphogypse ; utilisation d'un sous-produit industriel en technique routière"*, Chapitre VII.2, 132-140.
- Quibel A., 1978. Remblais expérimentaux au CER de Rouen ; étude de la pollution et du comportement mécanique. In LCPC, ed., *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, numéro spécial VII "Le phosphogypse ; utilisation d'un sous-produit industriel en technique routière"*, Chapitre VI.1, 99-109.
- [Raverdy M., 1978. Etude d'un liant à base de phosphogypse et de laitier.](#) In LCPC, ed., *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, numéro spécial VII "Le phosphogypse ; utilisation d'un sous-produit industriel en technique routière"*, Chapitre IV, 69-77.
- Roessler Charles E., 1990. Radon emanation from roads constructed with phosphogypsum aggregates. In Chang W. F., ed., *Proceedings of the third International Symposium on Phosphogypsum*: Orlando (USA). Publication n° 01-060-083, Florida Institute of Phosphate Research: Bartow (USA), volume I, pp. 30-43.
- Rouis Badreddine, 1991. *Contribution à l'utilisation de sous-produit industriel ; application au cas du phosphogypse de Sfax*. Thèse de doctorat, spécialité Mécanique, Université Joseph Fourier (Grenoble I): Grenoble (France), 182 pages.
- Rutherford P. M., Dudas M. J., Arocena J. M., 1996. Heterogeneous distribution of radionuclides, barium and strontium in phosphogypsum by-product. *The Science of the Total Environment*, vol. **180** (3), pp. 201-209.
- Savostianoff Dmitri, 1993. France : nouveau recul de la fertilisation. *Informations Chimie*, vol. **345**, pp. 60-63.
- Savostianoff Dmitri, Didier René, 1993. Acide phosphorique, les leçons de la crise. *Informations Chimie*, vol. **345**, pp. 69-80.
- Saylak Donald, 1995. Design, construction and evaluation of experimental stabilized gypsum roadbases. In *Proceedings of the Phosphogypsum Fact-Finding Forum*: Tallahassee (USA). Publication n° 01-132-117, Florida Institute of Phosphate Research: Bartow (USA), pp. 93-98.
- [Schaeffner M., 1978. Premiers résultats relatifs aux conditions de stockage et d'utilisation du phosphogypse dans les remblais routiers.](#) In LCPC, ed., *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, numéro spécial VII "Le phosphogypse ; utilisation d'un sous-produit industriel en technique routière"*, Chapitre V, 80-98.

Scholten L. C., Timmermans C. W. M., 1996. Natural radioactivity in phosphate fertilizers. *Fertilizer Research*, vol. **43**, pp. 103-107.

Schrödter Klaus, Bettermann Gerhard, Staffel Thomas, Hofmann Thomas, eds., 1991. Phosphoric acids and phosphates. In Elvers B., Hawkins S., Schulz G., eds., *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. VCH: New York (USA), vol. A19, fifth edition, pp. 465-503.

Sfar Felfoul H., Clastres P., Carles-Gibergues A., Ben Ouezdou M., 2001. Propriétés et perspectives d'utilisation du phosphogypse ; l'exemple de la Tunisie. *Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux*, vol. **849**, pp. 186-191.

Sfar Felfoul Hayet, Ouertani Nizar, Clastres Pierre, Benouezdou Mongi, 2002. Amélioration des caractéristiques du phosphogypse en vue de son utilisation en technique routière. *Déchets, Sciences et Techniques*, vol. **28**, pp. 21-25.

Simon Serge, 1990. *Commission chargée de contrôler l'évolution de la pollution en estuaire et en baie de Seine*. Brochure, Cellule de Suivi du Littoral Haut-Normand: Le Havre, 36 pages.

Simon Serge, Elkaim Bernard, Chouquet Bruno, 2000. *Rapport annuel sur la surveillance de la faune benthique à proximité des rejets de phosphogypses en estuaire de Seine*. Rapport technique n° 60, Commission chargée de contrôler l'évolution de la pollution en estuaire et en baie de Seine: Le Havre, 45 pages.

Simon Serge, Sarthou Jean-Marc, 1996. Bilan de santé d'un estuaire en convalescence. *SPI en Seine, Le Magazine de l'environnement industriel*, vol. **7**, p. 4.

Singh Manjit, 2000. Influence of blended gypsum on the properties of Portland cement and Portland slag cement. *Cement and Concrete Research*, vol. **30** (8), pp. 1185-1188.

Singh Manjit, 2002. Treating waste phosphogypsum for cement and plaster manufacture. *Cement and Concrete Research*, vol. **32** (7), pp. 1033-1038.

Singh Manjit, Garg Mridul, 2000. Making of anhydrite cement from waste gypsum. *Cement and Concrete Research*, vol. **30**, pp. 571-577.

Singh Manjit, Garg Mridul, Verma C. L., Handa S. K., Kumar Rakesh, 1996. An improved process for the purification of phosphogypsum. *Construction and Building Materials*, vol. **10** (8), pp. 597-600.

Smadi Mohammad M., Haddad Rami H., Akour Ahmad M., 1999. Potential use of phosphogypsum in concrete. *Cement and Concrete Research*, vol. **29**, pp. 1419-1425.

Smith Paul A., Theys Tibaut, 1998. Gypsum, a profitable, saleable product ? In *IFA Technical Conference: Marrakech*.

SNC-Lavalin, 1993. *Etude de l'impact sur l'environnement des rejets de phosphogypse des unités SIAPE et SAEPA à Gabès (Tunisie). Phase 1 : étude préliminaire*. Rapport technique, Société Industrielle d'Acide Phosphorique et d'Engrais, Société Arabe des Engrais Phosphatés et Azotés: Tunis (Tunisie), vol. 1 "Texte".

van der Heijde H. B., Klijn P.-J., Passchier W. F., 1988. Radiological impacts of the disposal of phosphogypsum. *Radiation Protection Dosimetry*, vol. **24** (1/4), pp. 419-423.

[Vautrain J., Gestin F., 1978. Utilisation du phosphogypse en remblai ; étude de la compressibilité.](#) In LCPC, ed., *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, numéro spécial VII "Le phosphogypse ; utilisation d'un sous-produit industriel en technique routière"*, Chapitre VI.2, 110-116.

Wenk Robert J., Henkels Paul L., eds., 1982. Calcium sulfate. In Grayson M., Eckroth D., eds., *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. John Wiley & Sons: New York (USA), vol. 4, third edition, pp. 437-448.

Wirsching Franz, ed., 1991. Calcium sulfate. In Gerhartz W., ed., *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. VCH: New York (USA), vol. A4, fifth edition, pp. 555-584.

Zakharova Tatiana, Tatàno Fabio, Menshikov Valery, 2002. Health cancer risk assessment for arsenic exposure in potentially contaminated areas by fertilizer plants: a possible regulatory approach applied to a case study in Moscow region (Russia). *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, vol. **36**, pp. 22-33.

Page : 2

[\[NCI1\] Normalement le texte est écrit par des spécialistes et les spécialistes travaille à l'élaboration des encyclopédies... !](#)

Page : 3

[\[NCI2\] Ceci n'est pas une fluorapatite mais une hydroxyl-chloro-fluorapatite.](#)

Page : 3

[\[NCI3\] Ceci est totalement folklorique, \$Ca_{10}\[\(PO_4\)_{6-x}\(CO_3\)_x\]F_x\(F,Cl,OH\)_2\$ pour rester relativement simple ! En fait il y a deux structures d'apatites, l'apatite A avec du carbonate dans les canaux \(là où se situent F, OH, Cl\), l'apatite B où le carbonate se situe dans la même position que le phosphore d'où la structure simplifiée donnée.](#)

Page : 5

[\[NCI4\] Glossaire](#)

Page : 5

[\[NCI5\] Homogénéisation de la bibliographie parenthèses ou crochets](#)

Page : 7

[\[NCI6\] Glossaire](#)

Page : 8

[\[NCI7\] Glossaire](#)

Page : 11

[\[NCI8\] En quoi ? La plâtre est la hémiedrite me semble-t-il.](#)

Page : 15

[\[NCI9\] Glossaire](#)

Page : 15

[\[NCI10\] Glossaire](#)

Page : 15

[\[NCI11\] Glossaire](#)

Page : 17

[\[NCI12\] Revoir la bibliographie en fonction de normes communes pour tout les dossiers.](#)

Annexe 12

Pneus

Avertissement

Décret 2002-1563

Pas d'accès au PDF.

Pneus

Résumé

Un pneu est constitué principalement de caoutchouc et contient également de l'acier (de 16 à 27% en masse selon le type de véhicule). L'ensemble des Pneumatiques Usagés (PU) des véhicules comprend les Pneumatiques Usagés Réutilisables (PUR) [1] et les Pneumatiques Usagés Non Réutilisables (PUNR [2]). Ce sont des déchets industriels non dangereux devant être éliminés. En France, le décret n° 2002-1563 du 24 décembre 2002, qui régit l'élimination des pneumatiques usagés, a été publié au Journal Officiel n° 303 du 29 décembre 2002. Ce décret organise l'ensemble des opérations d'élimination des PU, à l'exception de ceux équipant ou ayant équipé les cycles et cyclomoteurs. Au plan normatif, il n'existe pas à l'heure actuelle de normes française ou européenne relative au recyclage des pneus, ni de documents réglementaires concernant ces applications. Le stockage aérien non contrôlé des pneus peut constituer une source de nuisances (esthétique, ou liées au développement de larves, de moustiques, de rongeurs...) et présente des risques potentiels d'incendie et donc de pollution et de sécurité.

La première étape consiste, dans le cadre de la filière d'élimination des PU, à séparer les PUR des PUNR. Le critère technique de tri entre les PUR et les PUNR porte sur la profondeur de la sculpture et l'intégrité de la structure de l'enveloppe. Pour les PUNR, deux voies de valorisation sont pratiquées après un pré-traitement : la valorisation énergétique et la valorisation matière. Les PUNR sont valorisés entiers ou sous forme de demi-produits :

- **Pneus coupés** : morceaux supérieurs à 300 mm ;
- **Déchetats** : pneus découpés en morceaux irréguliers de 50 à 300 mm ;
- **Granulats** : pneus réduits à une granulométrie comprise entre 1 et 10 mm par processus mécanique, cryogénique ou thermique ;
- **Poudrettes** : particules de granulométrie inférieure à 1 mm, obtenue par réduction mécanique, cryogénique ou thermique.

Il existe très peu de données sur les caractéristiques mécaniques ou géotechniques des produits issus des pneus usagés (PUNR). Si les caractéristiques physiques et chimiques des pneus sont bien connues, il n'en est pas de même de leurs caractéristiques environnementales.

Les PUNR sont utilisés dans les applications en infrastructures routières selon la répartition suivante : pneus entiers (< 5 %) et demi-produits (> 95 %). Selon l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), 73 000 tonnes de PUNR ont été valorisées en 2001 en France, de la manière suivante :

- 60 000 tonnes sous forme de granulats et poudrettes ;
- 10 000 tonnes sous forme de pneus déchetats ;
- 3 000 tonnes sous forme de pneus entiers.

La valorisation dans le domaine du génie civil et sa validation scientifique ou technique se sont beaucoup développées dans les années 80.

Les recherches en cours s'orientent vers l'emploi de granulats ou de demi-produits de pneus directement comme granulats dans les applications telles que les remblais allégés, les dispositifs de drainage ou encore les **GABIONS** [3]

Définition

L'ensemble des pneumatiques usagés des véhicules (PU) comprend les *Pneumatiques Usagés Réutilisables (PUR)* et les *Pneumatiques Usagés Non Réutilisables (PUNR)*. Les PUR sont destinés au *rechapage* ou au marché des pneus d'occasion (France et export). Les PUNR doivent être éliminés. Les pneumatiques PUNR sont des déchets non dangereux et classés dans la rubrique 16 01 03 de la liste des déchets (liste unique définie dans l'annexe II du décret n° 2002-540 du 18 avril 2002).

Les pneumatiques concernés par cette rubrique sont des Pneumatiques Usagés Non Réutilisables (PUNR). Un pneumatique est déclaré non réutilisable par les professionnels du secteur (ALIAPUR) lorsqu'il ne remplit plus sa fonction initiale définie par « la mobilité en toute sécurité ».^[4]

Textes spécifiques de référence

Sommaire :

1 Textes

2 Normes françaises et européennes

1 Textes

Il faut rappeler que depuis le 1^{er} juillet 2002, il n'est plus possible de mettre en décharge les pneus entiers ou déchiquetés. L'arrêté du 9 septembre 1997 relatif aux décharges existantes et aux nouvelles installations de stockage de déchets ménagers et assimilés n'autorise la mise en décharge que pour les *déchets ultimes* (loi n° 92-646 du 13 juillet 1992). Le stockage des PU est soumis à la réglementation ICPE^[5] (Installations Classées pour la Protection de l'Environnement).

En France, le [décret n° 2002-1563](#) du 24 décembre 2002 relatif à l'élimination des pneumatiques usagés a été publié au Journal Officiel n° 303 du 29 décembre 2002.

Ce décret organise l'ensemble des opérations d'élimination des PU à l'exception de ceux équipant ou ayant équipé les cycles et cyclomoteurs. Il implique l'ensemble des acteurs de la filière, des producteurs aux éliminateurs (collecteurs, valorisateurs) en passant par les distributeurs et les détenteurs ainsi que les institutionnels. Il y est stipulé qu'il est « *interdit d'abandonner, de déposer dans le milieu naturel ou de brûler à l'air libre les pneumatiques* ». A l'exception des cas de réemploi et d'utilisation des PU en travaux publics, dans des travaux de remblaiement, de génie civil ou en cas d'**ensilage**, il est fait obligation de passer par l'intermédiaire d'installations agréées pour toutes les opérations d'élimination après collecte.

Ce décret s'applique :

- dans un premier temps, un an après la date de sa publication, aux PU de diamètre extérieur inférieur à 1400 mm ayant équipé ou équipant des engins comportant quatre roues ou plus,

- dans un second temps, deux ans après la date de sa publication, aux autres PU.

En outre, tous les stocks de PU au 01/07/2004 devront être éliminés au plus tard au 01/07/2009. La responsabilité des producteurs dans la filière est fortement accentuée. L'arrêté du 8 décembre 2003 relatif à la collecte des pneus usagés (ramassage, regroupement, tri) a été publié le 20 décembre 2003. Il fixe les conditions de délivrance préfectorale de l'agrément.

Au niveau européen, il n'existe pas encore de directive spécifique bien que les PU soient classés en tant que flux prioritaire. Cependant, des dispositions particulières existent déjà dans la directive 1999/31/CE du Conseil du 26 avril 1999 concernant la mise en décharge des déchets et dans la directive 2000/53/CE du Parlement européen et du Conseil du 18 septembre 2000 relative aux véhicules hors d'usage (VHU)^[6]. Cette dernière prévoit l'interdiction de mise en décharge des pneus usagés entiers à partir de 2003 et des pneus usagés broyés à partir de 2006.

2 Normes françaises et européennes

Au plan normatif, il n'existe pas à l'heure actuelle de normes française ou européenne dans le domaine du recyclage des pneus. Au niveau européen, un atelier européen CWA (CEN

Workshop Agreement^[7] a été créé en mars 2000 pour travailler sur la valorisation et le recyclage des produits issus des PU et a produit un document final (AFNOR, 2003). Ce document traite de la production de matériaux issus de pneumatiques usagés et fournit une classification de ces matériaux en vue de faciliter leurs spécifications dans les différentes applications représentatives. Il ne traite pas de la performance opérationnelle ou de l'utilisation de ces matériaux, ni des applications elles-mêmes. La démarche en cours vise à transformer ce document en norme, soit en créant un nouveau Comité ~~technique-Technique~~ (TC^[8]) du **CEN**^[9], soit en consultant le ~~bureau-Bureau technique-Technique~~ (BT^[10]) du CEN pour transformation directe en norme.

Origine, formation et élaboration

Les pneumatiques proviennent principalement de l'industrie automobile. La répartition par origine de détenteur (ADEME – ETRA 1999) est la suivante :

- professionnels du pneu 65 % ;
- garages et stations services 19 % ;
- grande et moyenne distribution 16 %.

1 - Origine et constitution d'un pneumatique

La coupe d'un pneumatique (figure 1) montre des profilés de gomme, des nappes de fils en acier ou en textile croisés ou parallèles et des tringles constituées d'assemblages de fils métalliques. Pour les pneumatiques à structure radiale développés à l'origine par Michelin (95% du marché dans l'UE en 2000 selon ETRA (ADEME, 2000), la nappe-carcasse - l'enveloppe (4) - est composée de minces câbles en fibres textiles disposés en arceaux droits et collés au caoutchouc. Les nappes-sommet - (5) sous la bande de roulement - sont armées de câbles en acier très fins, croisés obliquement et collées l'une sur l'autre. Les textiles utilisés majoritairement sont la rayonne, le polyester, le nylon et l'aramide. Le pneumatique est ainsi un composite formé d'assemblage de différentes structures, soit de 15 à 20 produits semi-finis et près de 200 matières premières. Ces structures doivent assurer des fonctions bien définies du pneumatique (ADEME, ETRA , 1999).

Les pneumatiques classiques (figure 1) sont constitués principalement de :

- une enveloppe proprement dit (1),
- une *bande de roulement* ^[11]sculptée (2),
- deux talons à tringle métallique (3),
- une nappe-carcasse (4),
- une nappe-sommet (5).

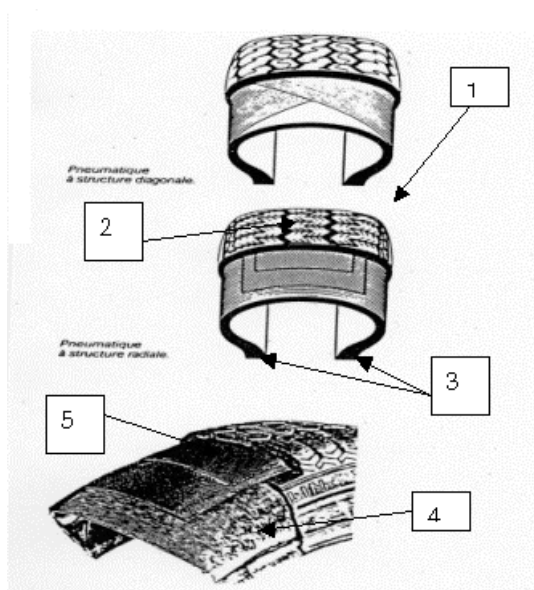


Figure 1 - Schéma d'un pneumatique

Le pneu est constitué principalement de caoutchouc. Sa constitution varie peu entre les pneus tourisme et poids lourd (tableau 1).

En Europe, selon ALIAPUR, un pneu tourisme parcourt en moyenne 40 000 km. Un pneu poids lourd parcourt 300 000 km et jusqu'à 1 million de km après rechapages.

Matériaux	Pneu Tourisme	Pneu Poids lourd
Elastomère	47 %	43 %
Noir de carbone	21,5 %	21 %
Acier	16,5 %	27 %
Textile	5,5 %	0%
Oxyde de zinc	1%	2 %
Soufre	1%	1%
Autres	7,5 %	6 %

Tableau 1 – Constitution moyenne des pneus

La quantité de pneumatiques usagés s'exprime généralement en masse (tonne). Le tableau 2 donne à titre indicatif, d'après une étude de [l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie l'ADEME \(ADEME\) \[12\]](#) (~~Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie~~), le poids moyen unitaire des pneus selon le type de véhicule, ainsi que les quantités générées de PU par an.

Type de véhicule	Masse (kg)	Nombre de pneus/t/an
Véhicules de tourisme	6,25	160
Véhicules utilitaires légers	11	91
Camions	50	20
Semi-remorques	55/80	12/18
Véhicules agricoles	100	10
Engins de travaux publics	100	10

Tableau 2 – Masse moyenne unitaire des différents types de pneus usagés (ADEME, 2000)

Plus récemment en 2004, ALIAPUR a défini quatre catégories de pneus PU en fonction de leur poids :

Catégorie A, —P pour un poids moyen : 6,5 kg

(Tourisme dont 4x4 tous terrains, enveloppes de secours spéciales ou galettes, camionnettes dont 4x4 tous terrains, petit agricole-agraires roues directrices, motos routières-non routières-trial)

Catégorie B₁ — P pour un poids moyen : 53 kg
 (Manutention inférieure à 60 kg, poids lourds, remorque agricole)

Catégorie C — P, pour un poids moyen : 77 kg
 (Pneumatiques agraires roues motrices, travaux publics, manutention comprise entre 60 et 200 kg)

Catégorie D₁ — P pour un poids moyen : 365 kg
 (Génie civil, manutention supérieures à 200 kg).

2 – Filières de valorisation des PUNR

Différentes étapes sont organisées avant l'entrée dans la filière de valorisation : la collecte, le tri, le transport et le stockage ; elles concernent les pneumatiques entiers. Le critère technique de tri entre les PUR et les PUNR porte sur la profondeur de la sculpture et l'intégrité de la structure de l'enveloppe. Pour homogénéiser la procédure, une démarche de certification unique au niveau européen des collecteurs dans les opérations de tri des PU a été proposée par l'ETRA [13] (European Type Recycling Association, ETRA, 2002). Selon l'ADEME (~~Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie~~), un professionnel du tri peut dégager 20 à 40 % d'un lot de pneus usagés PU sous forme de PUR. La situation du rechapage est actuellement délicate du fait de la présence et de la concurrence des pneus neufs à bas prix.

Pour les PUNR, deux voies de valorisation sont pratiquées après ce pré-traitement : la valorisation énergétique et la valorisation matière (Figure 2).

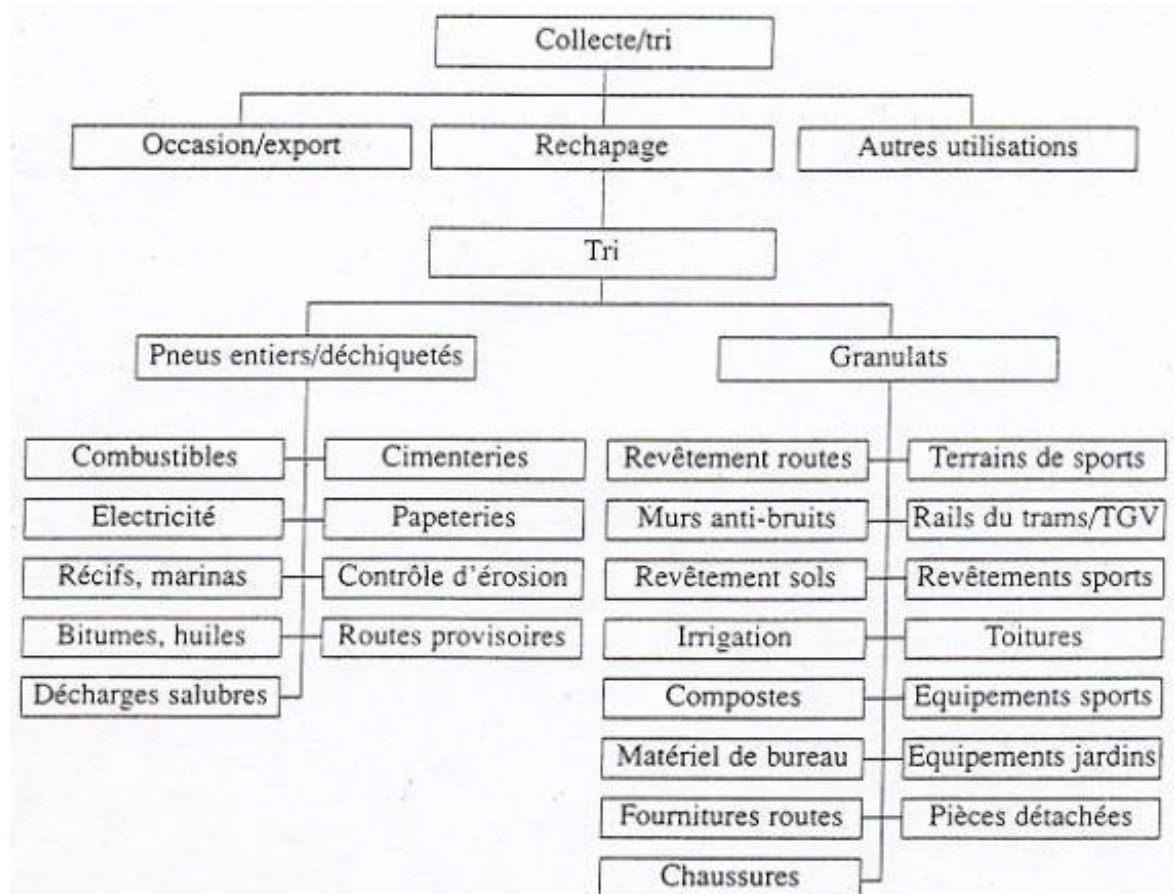


Figure 2 - Schéma des différentes filières de valorisation (ETRA, 1999)

Les définitions des demi-produits proposées ci-dessous sont celles retenues dans le CWA 14243 (Bertolini, 2002).

- La valorisation *énergétique* comme combustible a été développée notamment aux Etats-Unis et au Japon est désigné par FDP [14] (Fuel Dérivé du Pneu). Elle utilise le fort pouvoir calorifique du caoutchouc du pneu (34 MJ/kg), équivalent à celui du

charbon, dans les chaudières industrielles, les centrales thermiques, les unités d'incinération et les cimenteries. En France, cette filière a démarré en 1993. Mais elle croît faiblement, et reste actuellement limitée, en termes de volumes éliminés. En 2008, l'entrée en vigueur de la directive sur l'incinération des déchets pourrait réduire, voire interrompre la valorisation des pneumatiques usagés dans des anciens fours à procédés « humides », par manque de disponibilité de technologies de réduction des émissions.

- La valorisation *matière* intervient sous différentes formes (exemple en [figure-Figure 3](#)) et porte soit sur des pneumatiques entiers, soit sur des demi-produits en l'état, déchiquetés ou broyés. La recyclabilité des matériaux constituant les pneus reste très limitée. Le *recyclage des pneus* porte sur la toile, l'acier et la gomme. La valorisation de la toile se heurte actuellement à la très forte concurrence des textiles usagés, qui sont de meilleure qualité. Le caoutchouc régénéré, obtenu par *désvulcanisation* [\[15\]](#) du caoutchouc, est utilisé en complément du caoutchouc vierge dans des applications industrielles, mais son utilisation reste très limitée à cause des problèmes techniques liés au produit. La valorisation en demi-produits est plus prometteuse. Les domaines concernés sont l'industrie, la fabrication des pièces moulées, de produits d'étanchéité, d'isolation phonique (granulats, poudrettes) et, pour le génie civil, les sols sportifs, les sols amortissants, les enrobés, les ouvrages en terre (granulats, poudrettes, pneus entiers, déchiquetés). Pour ces demi-produits, le matériau est soit du caoutchouc, soit du pneu découpé.

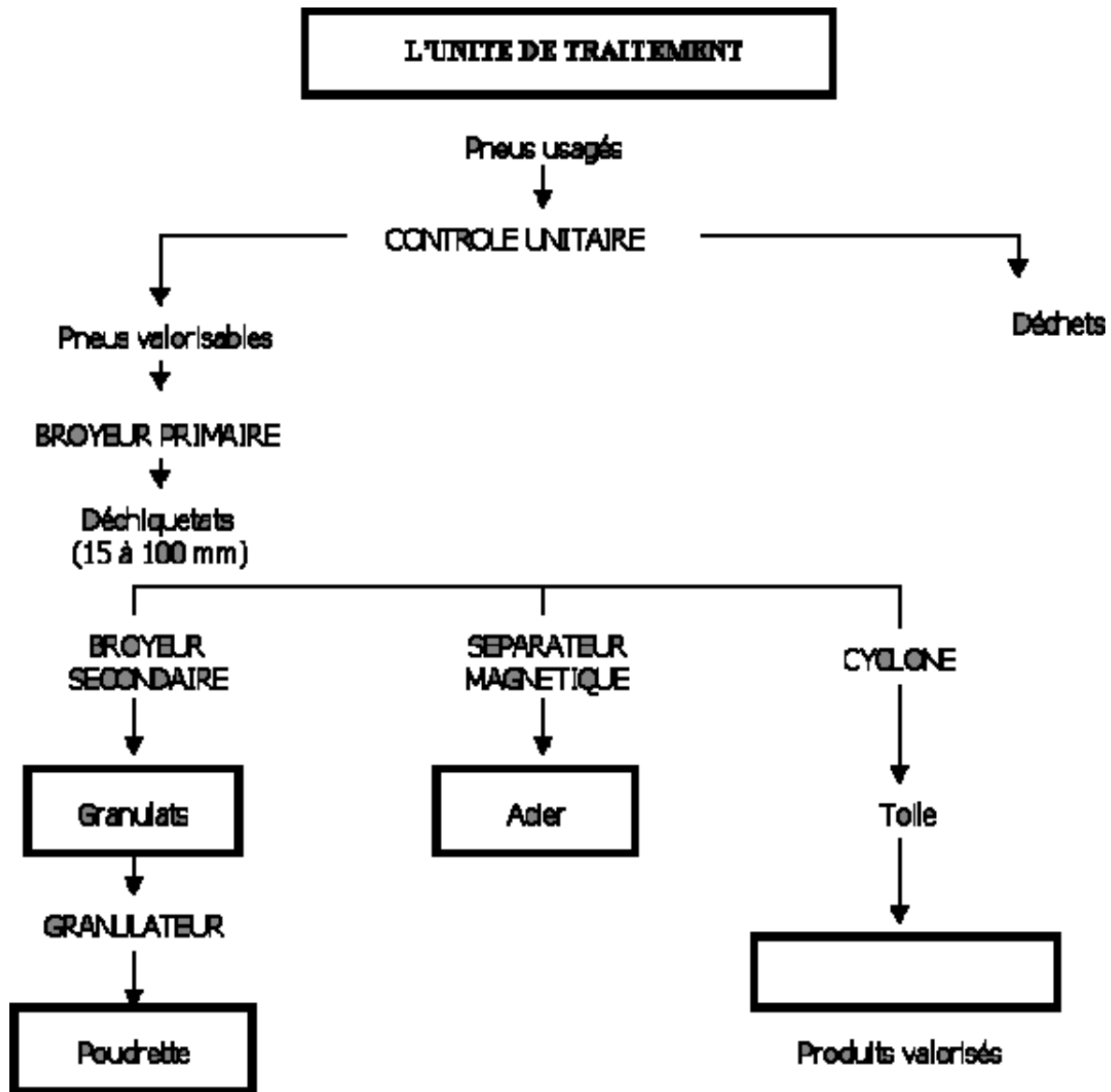


Figure 3 - Schéma d'une filière de valorisation matière (Interstate 880/Dixon Landing Road, 2001)

- Une autre voie encore peu développée, la thermolyse, permet à la fois la valorisation énergétique et la production des matières dérivées.

Selon l'ETRA (European Type Recycling Association), la valorisation dans le domaine du génie civil représente en 1999 de l'ordre de 9 % en moyenne de la filière de valorisation des PUNR dans l'Union européenne, soit de l'ordre de 230 000 tonnes par an (ADEME, 2000).

Caractéristiques physico-chimiques

La matière de base du pneumatique est composée principalement d'élastomère naturel (caoutchouc) ou synthétique (copolymère de styrène-butadiène ou autres issus de la pétrochimie) à laquelle on ajoute des charges (noir de carbone), des plastifiants, des antioxydants et des agents de *vulcanisation* tels que l'oxyde de zinc ou le soufre.

Caractéristiques générales (Michelin - Doc PU9903) : quelques caractéristiques générales du pneu sont indiquées ci-dessous :

- Humidité-humidité : < 1 % en poids₁
- Métaux-métaux lourds $\sum < 0,1$ % en poids (excepté pour le Zn)₁
- Température-température d'inflammation₁ : $\pm 338 \pm 8$ ° C₁

- Température-température d'auto inflammation, \pm 465 \pm 8 ° C.
- Pouvoir-pouvoir calorifique, \pm 32-34 MJ/kg.

Composition moyenne en poids des matériaux du pneu : le tableau 3 donne la composition moyenne élémentaire en pourcentage massique du pneu.

Eléments	Pneu Tourisme	Pneu Poids lourd	Source
Carbone (C)	71 %	62 %	ALIAPUR
Hydrogène (H)	7 %	6 %	
Oxygène (O)	4 %	3 %	
Azote (N)	0.5 %	0.5 %	
Soufre (S)	1 %	1 %	
Fer (Fe)	15,5 %	25,5 %	
Zinc (Zn)	1 %	2 %	
Halogènes (Chlore, Brome)	< 0,1 %	< 0,1 %	
Cuivre (Cu)	< 0,1 %	< 0,1 %	
Cobalt (Co)	< 0,05 %	< 0,03 %	
Plomb (Pb)	< 50 ppm	< 50 ppm	
Cadmium (Cd)	< 3 ppm	< 3 ppm	
Chrome (Cr)	< 100 ppm	< 180 ppm	
Nickel (Ni)	< 200 ppm	< 300 ppm	
Mercure (Hg)	Non détectable	Non détectable	
Sélénium (Se)	Non détectable	Non détectable	
Te+Sb+Se+V+Cr+Ni+Hg+As+Pb+Co+Sn	< 1000 ppm	< 1000 ppm	
PCP	Non détectable (< 0,5 ppm)	Non détectable (< 0,5 ppm)	
PCB-PCT *	Non détectable (< 0,5 ppm)	Non détectable (< 0,5 ppm)	
Zinc (Zn)	> 0,8	> 1,6	

*PCB Polychlorobiphényle – PCT Polychloroterphényle

Tableau 3 – Composition moyenne élémentaire du pneu en % massique ou ppm des éléments présents dans le pneu selon différentes sources.

Caractéristiques environnementales

Aucune donnée dans ce domaine n'a été obtenue.

Aspects sanitaires

Les PU ne sont pas des déchets dangereux. Mais leur stockage aérien non contrôlé peut constituer une source de nuisances (esthétique, développement de larves, de moustiques, de rongeurs...) et présente des risques potentiels d'incendie et donc de pollution et de sécurité. S'ils sont déposés en vrac, leur densité étant faible, leur volume est important. D'autre part, leur transport est coûteux et leur mise en en décharge est consommatrice d'espace. Depuis le 01/07/02, il n'est plus possible de les enfouir dans les CSD (Centre de Stockage) de classe 2.

Utilisation dans les infrastructures routières

Les PUNR sont utilisés sous différentes formes dans les applications en infrastructures routières : pneus entiers (< 5 %) et demi-produits (> 95 % : pneus découpés, déchiquetés, granulats ou poudrettes). Selon l'ADEME (ADEME, 2001), les 73 000 tonnes ont été valorisées en France de la manière suivante (Figure 4) :

- 60 000 tonnes sous forme de granulats et poudrettes ;
- 10 000 tonnes sous forme de pneus déchiquetés ;
- 3 000 tonnes sous forme de pneus entiers.

Les ouvrages concernés par l'utilisation de PUNR sont les couches de forme, les remblais, les murs de soutènement, les dispositifs de protection de berges, les structures-réservoirs, les drains, les couches de roulement ; des précisions sont apportées ci-après.

La valorisation dans le domaine du génie civil et sa validation scientifique ou technique se sont beaucoup développées dans les années 80 malgré même en l'absence de normes ou de documents réglementaires concernant ces applications.

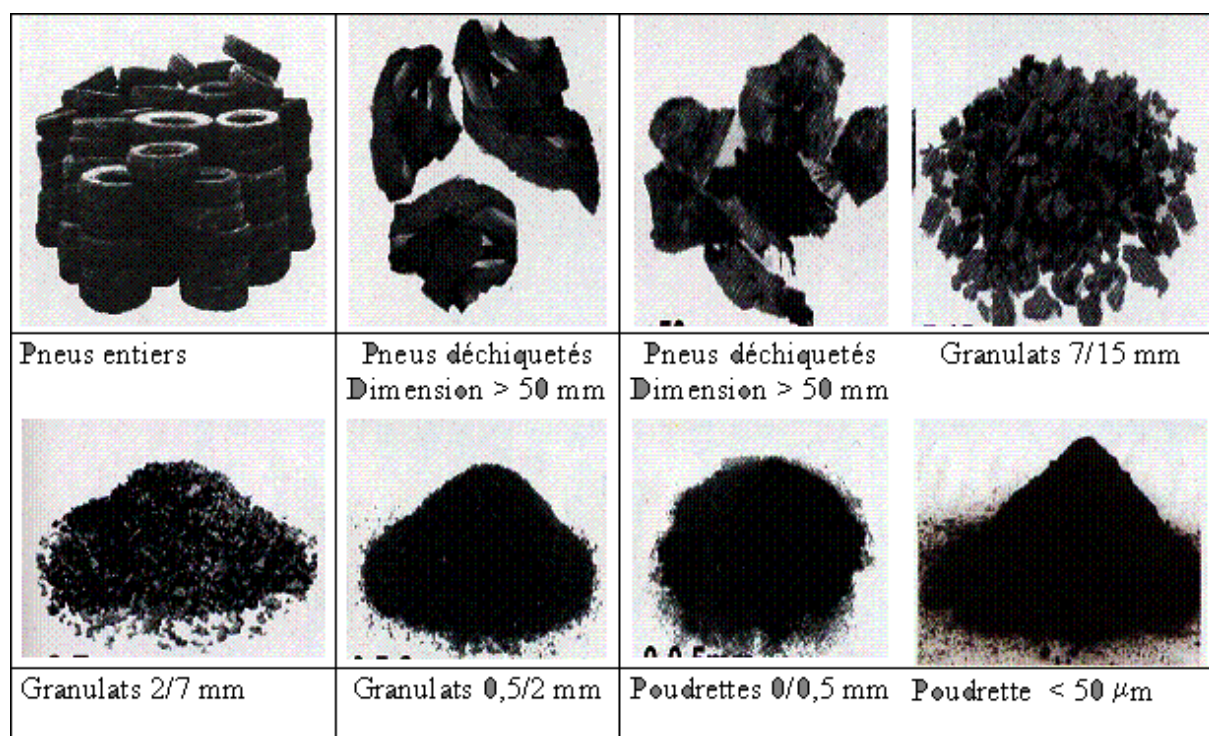


Figure 4 - Exemples de demi-produits issus des pneumatiques (Antoine, 2002)

1 - Remblais et ouvrages en terre

Ce sont principalement les ouvrages géotechniques : remblais routiers, ouvrages de soutènement, murs anti-bruit, massifs renforcés, dispositifs de protection de berges... Ces applications sont opérationnelles et certaines ont fait l'objet de brevets.

Dans ces applications, le pneu est utilisé soit entier, soit uniquement avec la bande de roulement, soit uniquement avec les flancs découpés, soit sous forme de déchiquetés ou de granulats. Les pneus peuvent être des pneus tourisme ou poids lourds. Au plan de la durabilité, des études citées dans (Long, 1985) ont montré que le vieillissement du caoutchouc du pneumatique est lié principalement aux actions de la lumière, de la chaleur, de l'ozone et de l'acidité du milieu. Pour les ouvrages géotechniques, ces facteurs ne jouent pas un rôle déterminant compte tenu de la nature du sol rencontré et du type d'ouvrage réalisé, ainsi que du niveau ou de l'intensité des facteurs cités. Dans ce domaine d'application, le volume consommé serait de l'ordre de 15 000 tonnes par an (ADEME, 2001).

- Le PNEUSOL ^â (Long, 1985 ; SETRA, 1989)

Le PNEUSOL^â est formé par l'association de pneus PUNR (poids lourds ou tourisme) entiers partiellement découpés (enlèvement d'un flanc) (figure 5) ou totalement découpés (deux flancs et une bande de roulement) et de sols. Les éléments de pneus sont utilisés comme renforts du massif de sol rapporté. Les bandes de roulement ou les flancs sont découpés et associés en nappe par des attaches. Ces bandes peuvent être posées sur champ ou aplaties (figure 6). Dans le cas de l'emploi des flancs, ceux-ci sont posés à plat. Cette technique, développée au Laboratoire Central des Ponts et Chaussées par N.T. Long, est largement diffusée depuis 1982. Plusieurs centaines d'ouvrages ont été construits en France et à l'étranger.

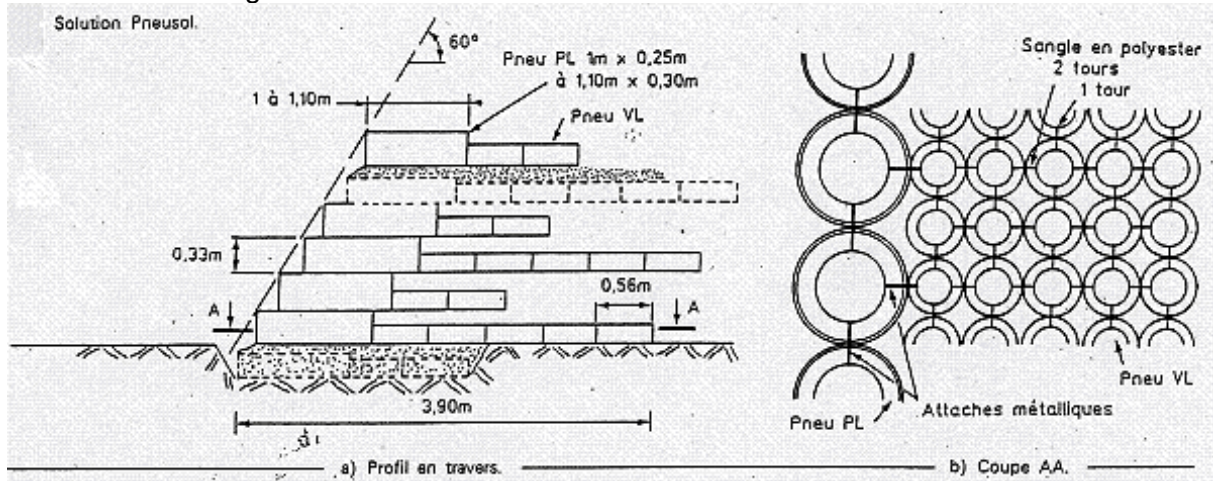


Figure 5 Schéma d'un remblai PNEUSOL (Long, 1985)



(a)



(b)

Figure 6 Vue des dispositions des éléments du pneu dans le remblai : Bande de roulement (a) et flancs (b) (Cartier et al, 1981)

Les différentes applications concernent des ouvrages de soutènement, des ouvrages réducteurs de poussées ou de charges, des murs anti-bruit (figure 7), des ouvrages de protection des berges et des pentes de talus (figure 8).



Figure 7 - Vue d'un mur anti-

bruit PNEUSOL^â (Long, 1985)



Figure 8 - Vue d'un remblai PNEUSOL^â (Beaumont et al, 1987)

L'avantage essentiel de ce type d'ouvrage, outre ses performances techniques, est essentiellement sa simplicité d'exécution et l'adaptabilité des ouvrages au relief et à la déformabilité du terrain.

- Le PNEUSOL léger (Long et Valeux, 1989)

C'est une technique dérivée de la technique PNEUSOL^â traditionnelle. On utilise les pneus poids lourds entiers. Les pneus sont disposés par nappe. Seul le volume correspondant à la jante est remblayé par du sol. Le poids volumique du PNEUSOL allégé varie de 6 à 8 kN/m³ et dépend de la couche de sol intercalaire. Les principales applications concernent des remblais allégés, des ouvrages d'absorbeurs d'énergie, des ouvrages répartiteurs de contraintes.

- Le PNEURESIL^â (ANRED, 1987 ; Coulet et Perrin, 1989 a)

Le PNEURESIL^â (Réalisation Souple Isolante Légère à l'aide de PNEU au rebut) a fait l'objet d'un brevet dont le développement était assuré par le bureau d'étude INGEVAL à Veyssilieu (38), l'entreprise Bianco et Cie à Ugine (73) et le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lyon à Bron (69). C'est une technique utilisant des pneus entiers sans

remplissage, ni liaisonnement pour des applications en remblai allégé. Les pneus sont empilés les uns sur les autres. Le poids volumique du PNEURESIL^â est de l'ordre de 3,5 kN/m³. Le procédé valorise 5 pneus poids lourds ou 25 pneus véhicules légers par m³ de remblai.

- L'ARMAPNEUSOL^â (Coulet et Perrin, 1992)

C'est également une technique qui dérive de la technique PNEUSOL traditionnelle. Il fait l'objet d'un brevet LCPC – Forézienne d'Entreprise (Saint Etienne – 42). Les pneus sont des pneus de poids lourds entiers avec un flanc en face supérieure découpé, remplis de sol. Il s'agit d'une technique de massif de sol renforcé par des nappes de treillis soudés. Les pneus sont disposés horizontalement et longitudinalement et jouent le rôle de parement. Dans le sens vertical, les lits de pneus sont décalés d'un niveau à un autre. Les éléments de renforts sont disposés horizontalement et pincés entre deux rangs de pneus. La pente de talus de l'ouvrage est relativement raide, de l'ordre de 75°.

- Le PNEUTEX^â (Mathieu et Marchal, 1989), (Coulet et Perrin, 1989 b)

C'est également une technique de renforcement de sol dérivée de la technique PNEUSOL^â traditionnelle. Le principe (figure 9) s'apparente à celui de la technique ARMAPNEUSOL^â.

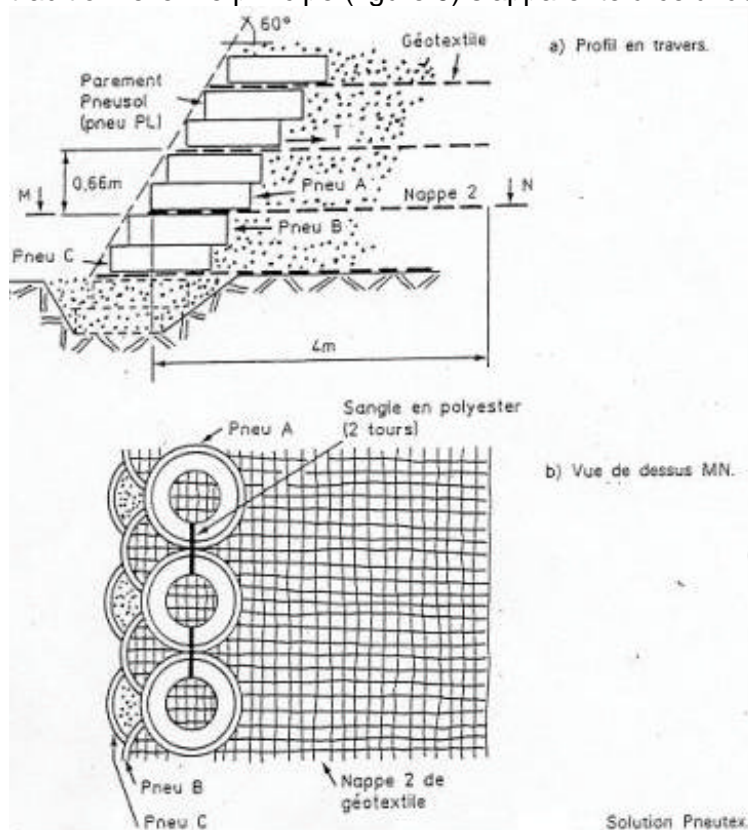
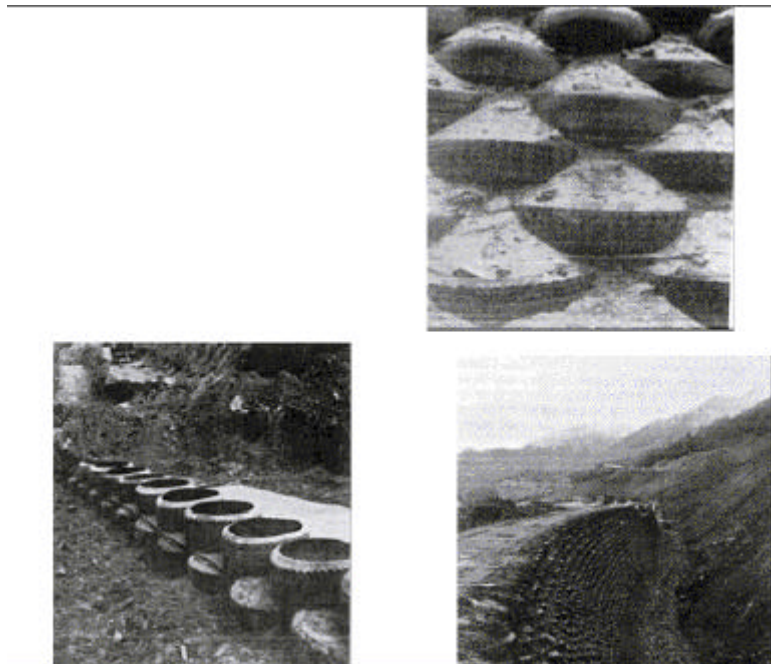


Figure 9 Schéma d'un remblai PNEUTEX^â (Mathieu et Marchal, 1989)

Les pneus sont des pneus poids lourds entiers avec un flanc en face supérieure découpé. Le renforcement du massif de sol est assuré par des nappes de géotextile. Les pneus sont disposés horizontalement et longitudinalement et jouent le rôle de parement. Les nappes de géotextile de renfort sont disposées horizontalement et pincées entre deux rangs de pneus (figure 10). Le premier ouvrage de merlon de protection a été construit en 1989 (Mathieu et Marchal, 1989).



**Figure 10 - Vue d'un remblai PNEUTEX[®] (Coulet et Perrin, 1989)
- Les GABIONS**

Les pneus usagés entiers (en particulier les pneus poids lourds) sont comprimés et encagés par un grillage métallique sous forme de ballots (figure 11) et utilisés ensuite comme matériau dans les ouvrages de type murs et remblais. Cette technique (figures 12) utilise également les demi-produits comme les déchiquetés et les granulats.



Tyres pressed into bales could be used for fill for walls and embankments.

GROUND ENGINEERING JUNE 2002

Figure 11 - Utilisation en gabion des pneus entiers (ADEME, 2001)



Figure 12 Utilisation en gabion et en vrac des granulats de pneus sous forme de pastille (CER – LMS, 2003 ; Luong et al, 2003)

- Les structures réservoirs

Des structures réservoirs hydrauliques constituées de pneus entiers ou de demi-produits en vrac ont été réalisées. Cette application est en cours de développement.

- Drains

Dans ce type d'application, les granulats en vrac sont utilisés directement dans des tranchées drainantes.

2 - Couches de chaussée

Les pneus sont utilisés sous forme de granulats ou de poudrettes pour la fabrication des enrobés destinés aux couches de roulement des routes. Les différentes fractions granulométriques utilisées sont : 0/0,5 mm ; 0,5/2 mm ; 2/7 mm et 7/15 mm.

- Le bitume - caoutchouc

La première application en France date de 1965 au Pecq (département 78). Mais l'idée a été ensuite abandonnée. Le procédé s'est développé aux Etats-Unis et a fait l'objet d'un brevet de Mc Donald. Un colloque international a été organisé en octobre 1981 à San Antonio (Texas – USA). Le développement de cette technique en France, pour des applications en enduit, date de 1982. Des enduits épais, des enrobés spéciaux (notamment drainants) et des bétons bitumineux minces ou très minces ont été réalisés. Le principe consiste à incorporer la poudrette de caoutchouc 0,2/1 mm ou 2 mm dans le bitume pour améliorer ses performances physico-mécaniques. Le dosage est de 15 à 20 %. En France, cette utilisation se développe peu, face à l'emploi généralisé des polymères dans les liants modifiés, plus économiques et plus pratiques (Bense, 1984 ; ADEME – ETRA, 1999). Néanmoins, il existe de nombreuses applications à l'étranger, notamment au Portugal, au Brésil, aux Etats-Unis et au Canada.

- Les enrobés aux liants hydrocarbonés

La poudrette est incorporée comme granulats dans le mélange lors de la fabrication de l'enrobé. Cette application vise à améliorer les caractéristiques acoustiques ou drainantes de l'enrobé. Le dosage est de l'ordre de quelques pourcents. Le gain en niveau de bruit routier annoncé par les fabricants peut atteindre de l'ordre de 5 dB en fonction du BB [\[16\]](#) de référence. Les poudrettes rentrent également dans la fabrication des enrobés drainants (ADEME – ETRA [\[17\]](#), 1999 ; Ballié, 1999 et Antoine, 2002).

Sources sur le territoire français

Suite à la publication du [décret n° 2002-1563](#), toute la filière de recyclage est en cours de mise en place. L'évaluation actuelle fait état de plus de mille sites de stockage. Quelques plate-formes existent, d'autres sont en cours de constitution (Bertolini, 2002). ALIAPUR

fournit une liste non exhaustive des plates-formes opérationnelles installées dans différentes régions en France.

En 2001, on a évalué à 401 000 tonnes la masse de pneumatiques usagés PU (environ 30 millions de pneumatiques) produits en France (ALIAPUR et ADEME). La provenance est la suivante (figure 13) :

- 248 000 tonnes des véhicules de tourisme et utilitaires légers ;
- 121 000 tonnes des poids lourds ;
- 32 000 tonnes d'autres secteurs (aviation, génie civil, agriculture, deux roues...).

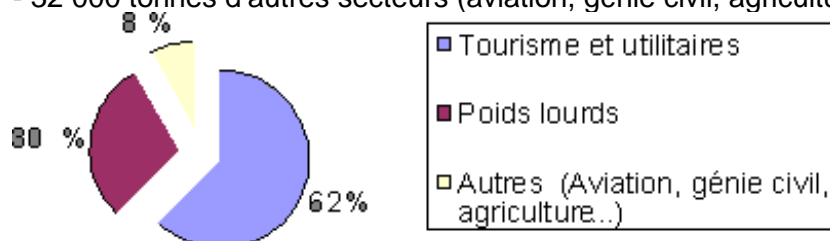


Figure 13 - Répartition des différents types et tonnage de pneus usagés PU (ADEME – ALIAPUR – 2001)

Sur cette production,

- 59 000 tonnes, dont 85 % de pneus poids lourds, sont réutilisées en rechapage;
- 40 000 tonnes sont réutilisées à l'export ;
- 40 000 tonnes sont écoulées dans la filière de valorisation énergétique ;
- 73 000 tonnes sont valorisées selon les filières suivantes : génie civil (fondation, soutènement, digues), poudrette (fabrication de bitumes et d'enrobés, de revêtement de sols sportifs, moulage d'objets en caoutchouc) ;
- 189 000 tonnes sont mises en décharges, contrôlées ou non, stockés par des particuliers ou utilisées par les agriculteurs pour l'ensilage (60 000 tonnes).

La valorisation porte sur la moitié des PU. Le potentiel de valorisation supplémentaire reste donc élevé (figure 14).

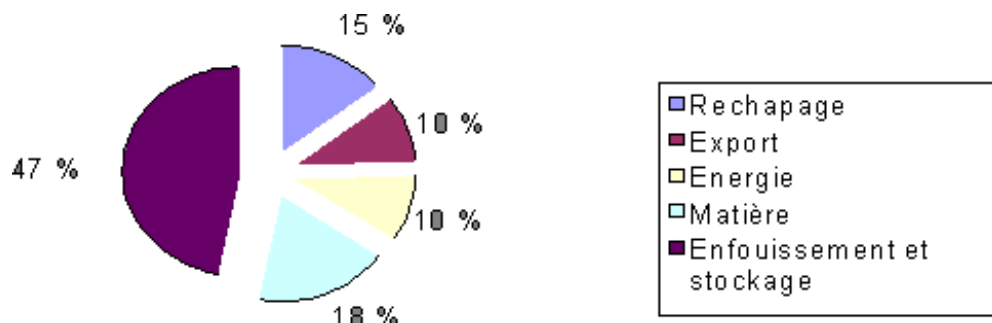


Figure 14 – Répartition par filière et tonnage de valorisation (ADEME – ALIAPUR – 2001)

Cette production annuelle vient s'ajouter aux stocks historiques ou orphelins existants, dont le tonnage estimé est de 950 000 tonnes dans le milieu agricole et 780 000 tonnes de stocks divers (plus d'un millier de sites estimés et 750 000 tonnes dans des stocks orphelins). Une enquête est actuellement menée pour répertorier l'ensemble de ces stocks.

En 2003, ALIAPUR a publié une nouvelle estimation du tonnage des PU pour 2002 qui fait ressortir une légère baisse du tonnage total à 390 000 tonnes et une répartition par filière, avec une forte augmentation pour les filières de valorisation énergétique et matière (Figure 15).



Figure 15 – Répartition par filière et tonnage de valorisation (ALIAPUR, 2002).

Plus de détails : [Sources en europe](#)

Emplois répertoriés

Il n'existe pas encore de base répertoriant les différents emplois des PUNR en infrastructure routière.

Recherches en cours

En infrastructure routière, la valorisation matière est une voie prometteuse et en plein développement. La recherche en cours s'oriente vers l'emploi des demi-produits de pneus directement comme granulats, dans les applications tels que les remblais allégés, les dispositifs de drainage, les gabions. Le domaine des mélanges de béton de ciment ou avec d'autres liants pour obtenir des mélanges composites de performances acoustiques, antivibratiles ou isolantes intéressantes constitue une autre voie très prometteuse. Les actions de recherche dans le domaine de la nocivité et de la durabilité des demi-produits restent à engager pour accompagner ce développement. Pour cela, la mise en place des actions de normalisation et de spécification technique en cours au niveau européen devraient contribuer au développement accéléré des différents domaines d'application des PU .

On peut signaler, dans ce cadre, les actions de l'ADEME et d'ALIAPUR avec son appel à projets de recherche-développement annuel.

Bibliographie^[18]

- ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), 1998. Valorisation des pneumatiques usagés en Haute Normandie. Fiche Région Haute Normandie - ADEME.
- ADEME, 2000. Etude de marché des granulats , poudrettes et déchetats de pneus usagés en France, Rapport final.
- ADEME, 2001. Du pneu à la poudrette. Plaquette ADEME.
- ADEME – ETRA (European Type Recycling Association), 1999. Pneumatiques usagés – Mettez la gomme sur la valorisation, Journées techniques ADEME – ETRA, recueil des interventions, Paris, 192 p.
- AFNOR (Association Française de NORmalisation) , indice T 47 500. AC CWA 14243, 2003. Matériaux issus de pneumatiques usés et leurs applications.
- ANRED (Agence Nationale pour la Récupération et l'Élimination des déchets)– Département Industrie IPD/BP, 1987. Le procédé PNEURESIL[®] , Note de présentation ANRED.
- ANTOINE J-P., 2002. MICROPHONE^â , CITYCHAPE^â , DRAINOPHONE^â , EPSIBEL^â , Une gamme complète de revêtement silencieux , revue RGRA (revue générale des routes et aérodromes).
- BALLIE M , 1999. COLSOFT^â absorbe le bruit et recycle les pneus. Bilan des performances acoustiques, Revue RGRA (revue générale des routes et aérodromes) n° 779.
- BALLIE M., 2000. Enrobés non bruyants pour couches de roulement utilisant des poudrettes de caoutchouc issues de recyclage des pneumatiques usagés. Caractéristiques de surface des chaussées, Nantes, IVe symposium international « SURF 2000 », AIRPC.
- BEAUMONT J. , LONG N-T, PIONA I., URSAT P., 1987. Mur PNEUSOL – Efficacité acoustique. Rapport LRPC (Laboratoire régional des ponts et chaussées) de Strasbourg, 33 p.
- BENSE P., 1984. Utilisation des caoutchoucs de pneumatiques en technique routière . Compatibilité entre les liants hydrocarbonés traditionnels et la poudrette de pneus

cryobroyés . Rapport du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Nancy , CETE (Centre d'Etude technique de l'Equipement) de l'Est, France, 152 p.

BERTOLINI G., 2002. Commerce extérieur – Matériaux et produits de récupération. Environnement & Technique n° 219.

CARTIER G., LONG N-T., POUGET P., BARGILLAT R., CUDENNEC J-P. , 1981. Déchets urbains et pneumatiques usagés en génie civil. Congrès international de Mécanique des Sols et des Travaux de Fondation, Stockholm, et 1984 Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées Spécial XI, France.

CER (Centre d'Expérimentation Routière) – LMS (Laboratoire de Mécanique des Solides) de l'Ecole Polytechnique, 2003. Caractérisation du comportement d'une structure de remblai en granulats NIKOPNEU. Rapport interne – CER – LMS

COULET C., PERRIN J., 1989 a). Réemploi de pneumatiques usagés en technique routière – Procédé PNEURESIL[®] , Epagny (74) – RN 508 – Franchissement du canal de Calvi, Fiche Région Rhône-Alpes/ADEME.

COULET C., PERRIN J., 1989 b). Réemploi de pneumatiques usagés en technique routière – Procédé PNEUTEX[®] , Aigueblanche (73) – RN 90 – Merlon de protection contre les chutes de blocs, Fiche Région Rhône-Alpes/ADEME.

COULET C., PERRIN J., 1992. Soutènement avec parement en pneus usagés – Procédé ARMAPNEUSOL[®] , Bretelle – Déviation autoroutière de St-Chamond (42), Fiche Région Rhone-Alpes/ADEME.

ETRA (European Type Recycling Association), 1999. La valorisation des pneumatiques usagés. Brochure ETRA/ADEME. 16 p.

ETRA (European Type Recycling Association)News, 2002. Volume 6, Issue 2.

European specifications CWA 14243, 2002. Innovative Materials, Products and Applications from Post-Consumer Tyres. Plaquette CEN (Comité Européen de Normalisation)/ETRA (European Type Recycling Association).

FAURE M., LRPC Clermont Ferrand, 1985. Les utilisations routières de la poudrette de caoutchouc. Recyclage du caoutchouc et des matières plastiques, Journée technique ADEME.

Ground Engineering, 2002. Utilisation des pneus compressés et conditionnés sous forme pde gabions en Grande Bretagne.

Interstate 880/Dixon Landing Road - Californie – USA, 2001. Utilisation des déchetats de pneus en couche de forme pour allègement de la structure, Revue RGRA n° 798.

Journée technique ADEME, Comité des Constructeurs français d'Automobile (CCFA), Chambre syndicale Internationale de l'Automobile et du Motocycle (CSIAM), 2002. Pneumatiques usagés : état des lieux. Route Actualité n° 120 de décembre 2002.

LEMESLE J-P., Entreprise J Lefebvre, 1999. La Route : La plus grande carrière de France – Recyclage et valorisation des sous - produits dans l'industrie routière, Revue Travaux n° 758.

LONG N-T., VALEUX J-C., 1989. Le PNEUSOL léger . Rapport des Laboratoires GT 37 LCPC, 51 p .

LONG N-T., DELMAS P., POUGET P.,1984. Soutènement avec armature. Utilisation de pneumatiques usagés. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°129, France.

LONG N-T., 1985. Le PNEUSOL. Rapport des Laboratoires GT 7 LCPC (Laboratoire central des ponts et chaussées), 36 p.

LUONG M-P., EYTARD J-C., KHAY M., VINCESLAS G., PAPACHRISTOU D., 2003. Transmissibilité vibratoire d'un géomatériau de recyclage. Communication au Colloque National Parasismique, Palaiseau , France.

MATHIEU Y., MARCHAL J., 1989. Déviation de la route nationale 90 à Aigueblanche – Réalisation d'un massif renforcé par géotextile et parement Pneusol : le Pneutex. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°162.

MICHELIN, 1999. Michelin, Le pneu et l'environnement, Revue RGRA (revue générale des routes et aérodromes), Hors série 1,1999, pp 90 à 93.

Norauto, Association Les Eco Maires, 2002, Actes de la matinée-débat du 24 septembre 2002 au Sénat (Paris) : Le recyclage des pneumatiques usagés.

OGER P., CHRISTORY J-P., PETITGRAND J-C. , 2002. TRAC[®] : un matériau innovant pour le BTP. Revue RGRA (revue générale des routes et aérodromes) n° 810.

SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes), 1989. Le PNEUSOL (Soutènement-Répartiteur de contraintes). Note d'Information Technique n° 47.

SHULMAN V-L., ETRA (European Type Recycling Association), 2000. Introduction to tyre recycling.

SMOLDERS E , DEGRYSE F., 2002. Fate and effect of zinc from tire debris in soil. Environ. Sci .Technol. 36, p 3706 à 3710.

URSAT P., 1998. Remblai PNEUSOL sur buse MATIERE - RN 67 – Chaumont, Note du LRPC de Nancy –URSAT P., 19 p.

Page: 1

[\[1\] Glossaire](#)

Page: 1

[\[2\] Glossaire](#)

Page: 1

[\[3\] Glossaire](#)

Page: 2

[\[4\] Pourquoi italiques?](#)

Page: 2

[\[5\] Glossaire](#)

Page: 2

[\[6\] Glossaire](#)

Page: 3

[\[7\] Glossaire](#)

Page: 3

[\[8\] Glossaire](#)

Page: 3

[\[9\] Glossaire](#)

Page: 3

[\[10\] Glossaire](#)

Page: 3

[\[11\] Pourquoi italique?](#)

Page: 4

[\[12\] Glossaire](#)

Page: 5

[\[13\] Glossaire](#)

Page: 5

[\[14\] Glossaire](#)

Page: 6

[\[15\] Glossaire](#)

Page: 14

[\[16\] Glossaire](#)

Page: 14

[\[17\] Glossaire](#)

Page: 16

[\[18\] Problème d'homogénéisation des références bibliographiques par rapport à un modèle utilisé pour tous les dossiers.](#)

Annexe 13

Sables de fonderie

Avertissement :

Les sables de fonderie

Résumé

Le recyclage des sables de fonderie porte uniquement sur les sables usés qui n'ont pas pu être régénérés en fonderie dans le procédé de moulage des pièces métalliques. Une circulaire du ministère de l'Environnement, datant de 1991, précise les filières d'élimination pour certaines catégories de sable de fonderie. Ils font également l'objet de guides régionaux, dont celui de Normandie-Centre en 2000 et du Nord-Picardie en 2002.

Ces matériaux sont principalement constitués de sable d'origine naturelle mélangé à des liants de nature très variée (argile, silicate de soude, ciment, résine au phénol, autres types de résine) et à des résidus de métaux fondus. Selon le procédé de moulage, ils peuvent contenir des fines poussières, des inclusions métalliques ou des morceaux de moules non détruits, ~~ce qui peut modifier~~ Ces modifications induites par les processus (ou procédés au choix) de fabrication peuvent perturber la répartition granulaire d'origine, comprise entre 0,1 et 1 mm. La présence éventuelle de polluants dans les sables de fonderie dépend beaucoup de la nature du liant, surtout les résines phénoliques et autres liants organiques, et parfois de la solubilité des métaux lourds contenus dans l'alliage coulé. ~~Néanmoins, d~~ Des traitements par biodégradation en présence de micro-organismes permettent de réduire le taux de phénol dans les sables usés ~~en au~~ dessous des seuils d'acceptation de l'arrêté du 16 juillet 1991, ce qui offre la possibilité de valoriser une plus grande quantité de sables rejetés par les fonderies.

Les ~~caractérisations~~ caractéristiques géotechniques classent ce matériau en F₉ pour la réalisation de remblaiement de tranchée ou pour la réalisation de couche de forme. Lors d'un traitement avec un liant (laitier, chaux, ciment), il faut toujours s'assurer ~~par une étude préalable~~ que le sable usé ne modifie pas la prise hydraulique de la formulation envisagée.

Etant donné que les sables usés sont des sous-produits de l'industrie de la fonderie, les sources d'approvisionnement dépendent directement des paramètres suivants :

- leurs disponibilités sur le territoire français se situent dans les mêmes zones géographiques que les établissements de fonderie ;
- le volume à recycler est directement lié à la capacité et aux cadences de production des pièces de fonderie ;
- leurs multiples caractéristiques dépendent du type de pièce à mouler.

Le recyclage des sables usés en construction routière existe depuis les années 1980 en substitution des sables naturels dans les formulations de matériaux de chaussées. Des recherches sont en cours non seulement pour valoriser des sables fortement phénolés, mais aussi pour organiser des installations spécialisées dans la préparation de sables de fonderie ~~qui peuvent~~ dans l'objectif de fournir des stocks pérennes et homogènes à des entreprises du BTP.

Définition

Liés avec des argiles ou des résines, les sables de fonderie sont utilisés pour confectionner des moules et des *noyaux* dans lesquels sont coulés les métaux en fusion.

Après l'opération de démoulage des pièces métalliques, une grande partie des sables est réutilisée sur place par régénération, tandis que les sables usés de fonderie résiduaire [1]

(considérés comme résidus?) (nommés également « sables rejetés », « vieux sables » ou « sables brûlés ») doivent être éliminés.

Cette rubrique se propose d'étudier les conditions de recyclage, en technique routière, des sables usés de fonderie ne pouvant être réaffectés à l'activité de fonderie.

Textes spécifiques de référence

Sommaire

1. Références législatives et réglementaires

2. Documents techniques

1. Références législatives et réglementaires

- [Arrêté du 16 juillet 1991](#), relatif à l'élimination des sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse (JO n°230 du 2 octobre 1991).

- [Circulaire n°91-59 du 16 juillet 1991](#), relative à l'application de l'arrêté ministériel relatif à l'élimination des sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse.

L'élimination-Le recyclage ou la mise en décharge des sables de fonderie est réglementée au niveau français par l'arrêté du 16 juillet 1991 sur l'élimination des sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse, précisé par la circulaire n°91-59 du 16 juillet 1991. L'arrêté n'impose pas une filière particulière de traitement. Il fixe seulement le type de décharge dans lequel peuvent être admis les sables usés ainsi que les modes de valorisation possibles en fonction des caractéristiques du déchet. Trois types de décharges stockages sont envisageables : décharge de classe Centre de Stockage de Déchets (CSD) de classe I, décharge de classe CSD de II et décharge et le centre de stockage spécifique pour sables de fonderie à très faibles teneurs en phénols. Les sables usés sont classés en fonction de leur teneur en phénols (tableau Tableau n°1).

On distingue donc :

1. les sables imbrûlés contenant des liants organiques de synthèse,
2. les sables contenant des liants organiques de synthèse brûlés au cours de leur utilisation,
3. les sables ne contenant que des liants organiques naturels ou des liants minéraux.

Seule la première catégorie est susceptible de contenir une part importante de phénols. La teneur effective en phénols est alors utilisée comme critère pour déterminer la destination finale du déchet.

	Filières de traitement		Teneur en phénols Lixiviats NF X31-210	Conditions
TITRE I : Sables liés par des liants organiques de synthèse	Sables non brûlés	Mise en décharge de classe I	> 50 mg/kg	
		Mise en décharge de classe II	< 50 mg/kg	Selon l'arrêté préfectoral, complété par des contrôles d'admission en ICPE
	Sables brûlés non retenus au tamisage	Mise en décharge de classe II		
		Mise en décharge spécifique ou éventuellement avec des déchets inertes	< 5mg/kg	Selon l'arrêté préfectoral, complété par des contrôles d'admission en ICPE
TITRE II : Sables de fonderie à très basse teneur en	Mise en décharge spécifique ou éventuellement avec des déchets inertes		< 5mg/kg	Le contexte du dépôt doit permettre d'éviter l'interaction avec les eaux de surface et

phénols				souterraines
TITRE III : Sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse	Valorisation	Utilisation en remblai	< 1mg/kg	Interdit pour le remblaiement de carrières et excavations si possibilité d'interaction avec les eaux de surface et souterraines
		Fabrication de produits à base de liants hydrauliques	< 5mg/kg	
		Tout procédé susceptible de détruire les phénols, dans une ICPE autorisée	> 5 mg/kg	Tuileries, briqueteries, cimenteries

Tableau n°1 : Filières d'élimination des sables de fonderie selon le taux de phénols.

- [Décret n°2002/540/CE du 18 avril 2002](#) relatif à la classification des déchets (JO n°93 du 20 avril 2002).

Selon cette nomenclature française des déchets, les sables de fonderie sont inscrits dans le chapitre 10, « Déchets provenant de procédés thermiques », et sont répertoriés sous la rubrique 10.09 ou la rubrique 10.10 sous les codes suivants (l'astérisque signifie que le déchet est considéré comme un produit dangereux s'il présente une ou plusieurs des propriétés énumérées à l'annexe I du décret du 18 avril 2002) :

1. « déchets de fonderie de métaux ferreux » :

- 10.09.05*Noyaux et moules de fonderie n'ayant pas subi la coulée contenant des substances dangereuses
- 10.09.06 Noyaux et moules de fonderie n'ayant pas subi la coulée autres que ceux visés à la rubrique 10.09.05
- 10.09.07*Noyaux et moules de fonderie ayant subi la coulée contenant des substances dangereuses
- 10.09.08 Noyaux et moules de fonderie ayant subi la coulée autres que ceux visés à la rubrique 10.09.07

2. « déchets de fonderie de métaux non ferreux » :

- 10.10.05*Noyaux et moules de fonderie n'ayant pas subi la coulée contenant des substances dangereuses
- 10.10.06 Noyaux et moules de fonderie n'ayant pas subi la coulée autres que ceux visés à la rubrique 10.10.05
- 10.10.07*Noyaux et moules de fonderie ayant subi la coulée contenant des substances dangereuses
- 10.10.08 Noyaux et moules de fonderie ayant subi la coulée autres que ceux visés à la rubrique 10.10.07

La valorisation des sables usés concerne uniquement les sables de fonderie non dangereux, référencés 10.09.06, 10.09.08, 10.10.06 ou 10.10.08.

2. Documents techniques

- Guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et co-produits industriels, (CETE Nord Picardie, 2002).
- Utilisation des matériaux de Haute-Normandie, Guides techniques et monographies, (DRE Haute Normandie & CETE Normandie-Centre, Mars 2000).

Origine, formation et élaboration

Sommaire

1. L'industrie de la fonderie

2. Le recyclage des sables usés, en fonderie

1. L'industrie de la fonderie.

La fonderie permet la réalisation de pièces mécaniques par remplissage d'un moule avec un alliage métallique liquide en fusion. Le procédé de moulage (à moules perdus, à moules semi-permanents, à moules permanents métalliques) dépend du modèle de la pièce envisagée, dont les caractéristiques répondent à des spécifications définies par le client.

Parmi les procédés de moulage (BIPE Conseil, 1996), seuls le procédé à moules perdus utilise, et rejette en partie, de grosses quantités de sable. Ce procédé consiste à créer une empreinte en sable par assemblage de plusieurs modèles, qui déterminent les formes extérieures (opération de moulage) et qui assurent la réalisation des parties creuses (opération du noyautage).

La fabrication des pièces mécaniques par le procédé du moulage au sable se fait schématiquement en plusieurs étapes successives (figure n°1) :

Les deux étapes préliminaires consistent à élaborer l'alliage dans les fours de fusion et à concevoir le moule selon les spécifications de la pièce.

Après la coulée et le refroidissement du métal, viennent dans l'ordre :

- Le Par l'action de décochage, : le moule est détruit pour récupérer la pièce.
- § L'ébarbage Par l'action d'ébarbage, : la pièce est débarrassée des jets de coulée, des évents et des bavures métalliques.

Au final, la pièce brute de fonderie subit des opérations de finition (traitement de surface, traitement thermique,...) afin d'obtenir une pièce finie de meilleure qualité.

90% du sable brûlé est recyclé à la confection de nouveaux moules par ajout de sable neuf et moyennant une préparation spécifique. Le sable restant (10%) est rejeté du procédé de fabrication. A ce stade, le « sable usé » est considéré comme un déchet de fonderie et peut éventuellement suivre une autre voie de recyclage.

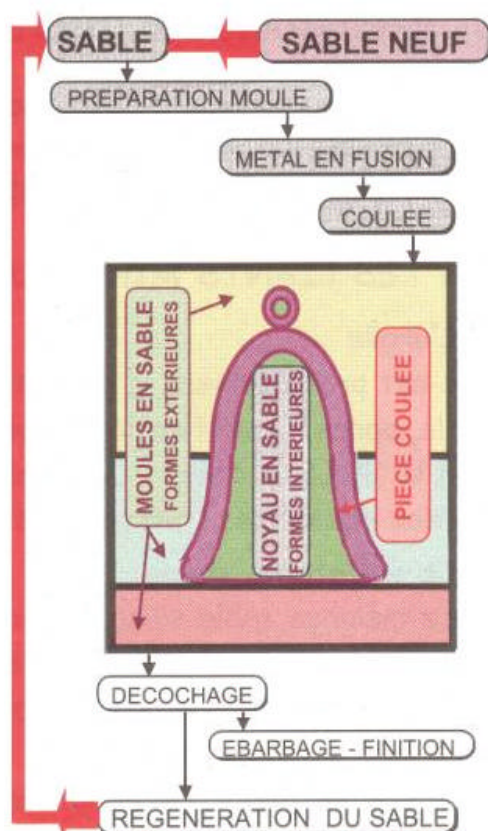


Figure n°1 : Procédé de moulage au sable des pièces métalliques (CETE Nord Picardie, 2002).

2. Le recyclage des sables usés, en fonderie.

La conjugaison des coûts d'achats des sables neufs, de leur transport et du tonnage considérable de sable nécessaire à la confection des moules et des noyaux (estimé globalement de 5 à 10 fois le volume des pièces produites) a incité l'industrie de la fonderie à recycler préférentiellement les sables usés dans leur procédé de moulage des pièces métalliques. Ainsi, plusieurs techniques de recyclage se sont développées pour régénérer un maximum de sable usé (Devaux P., 1984) :

- La récupération par voie humide : elle présente l'avantage de ne pas dégager de poussières durant le recyclage des sables à l'argile et au silicate de ~~soude-soude~~;
- La récupération par voie sèche : elle consiste à éliminer les déchets métalliques par criblage et de réduire les blocs par action mécanique (grenailage, broyage);
- La récupération thermique : elle consiste à détruire par calcination autour de 800°C la couche de résine polymérisée qui entoure les grains de sable.

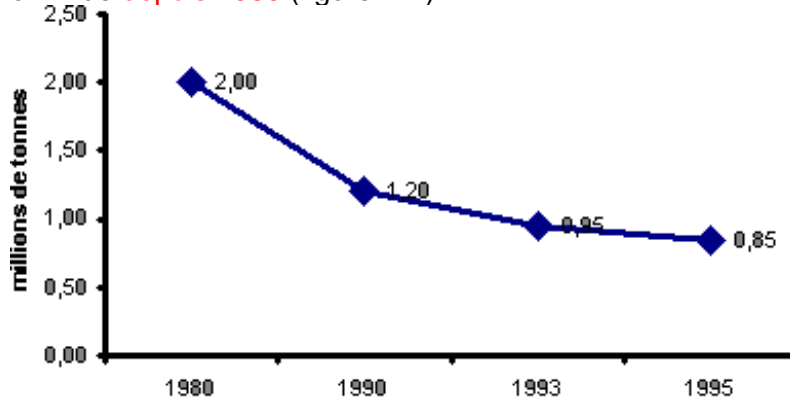
Selon la nature du sable de moulage, le potentiel de recyclage des sables usés peut également varier :

- Sable à l'argile » 98%
- Sable au silicate de soude 25% à 100%
- Sable au ciment » 50%
- Sable à la résine » 70%

Néanmoins, ces sables régénérés ne sont pas utilisés directement à l'état brut mais ils sont systématiquement complétés par du sable neuf. Les taux de recyclage peuvent alors évoluer sensiblement en fonction de la situation géographique de la fonderie, de la technique de moulage et du volume de production des pièces.

Au final, les sables usés de fonderie ne sont pas intégralement régénérés. L'industrie de la fonderie estime qu'en moyenne, pour une tonne de pièces de fonderie produite, on utilise 10 tonnes de sable de fonderie dont environ 1 tonne doit être éliminée. En 1995, il a été produit approximativement 850 000 tonnes de sables usés, dont 300 000 tonnes ont été déposées en ~~centre de stockage-CSD~~ de classe 1.

Il est important de souligner que depuis 1980 le volume de sables usés a considérablement diminué ~~depuis 1980~~ (figure n°2).



Source : SGFF

Figure n°2 : Quantité de sables usés non-traités en fonderie.

Dans le même temps, les industriels sont à la recherche de nouveaux débouchés, autres que le stockage dans un centre spécialisé :

- § l'industrie cimentière comme matière secondaire ;
- § l'industrie du béton manufacturé comme addition dans les parpaings ;
- § La fabrication de verre et de laine de verre.

Signalons qu'il existe actuellement des filières biologiques de traitement des sables phénolés afin détruire les molécules organiques et par ce fait de les rendre inertes et utilisables dans les infrastructures routières (cf. § 6.2).

Caractéristiques physico-chimiques

Sommaire

1. Les sables de moulage
2. Les sables usés
3. Particularités des sables au contact des métaux
4. Particularités des sables à la résine
5. Essai électrochimiques

1. Les sables de moulage.

L'industrie de la fonderie utilise de nombreux types de sables (Aron et al., 1993) qui servent à confectionner des moules et des noyaux pour le moulage de ces pièces métalliques. ~~Le pt~~ **En général us souvent en le** sable siliceux complété par un liant minéral ou organique, ~~les Les~~ sables de moulage doivent présenter diverses qualités :

- ~~la une~~ plasticité et ~~la une~~ cohésion, pour donner une empreinte fine et durable ;
- ~~des propriétés la~~ **réfractarité réfractaires**, pour supporter, sans décomposition ni déformation, le contact du métal fondu, surtout pour les éléments de noyaux ;
- ~~une la~~ porosité et ~~la un~~ perméabilité, pour permettre aux gaz formés lors de la coulée du métal une évacuation facile à travers la masse du moule.

Les sables sont d'origine naturelle (sable de Fontainebleau, sable de Hagenau en Alsace) constitués principalement de grains de silice pure (quartz) ou exceptionnellement d'autres minéraux comme la chromite, le zircon, l'olivine.... Ils ne présentent généralement pas plus de 0,5% d'impuretés (oxyde de fer, aluminium, ...) ainsi qu'une très faible quantité d'argile. Pour des questions tant de prise de liant que de rejets, le pH des sables mesurés dans l'éluat est sensiblement neutre. [3]

Lors de l'élaboration du sable de moulage, différentes catégories de liants sont mélangées au sable d'origine selon les applications envisagées et le type d'alliage. Les principaux sables de moulage sont répertoriés ci-dessous :

- Sables à l'argile

L'incorporation de 5% à 10% d'argile est très utilisée pour la confection des moules, appelé « moulage à vert ». Il peut s'agir d'argiles réfractaires comme la kaolinite et l'halloyste, mais également d'argiles plus fines et plus plastiques comme les bentonites (calciques ou sodiques) et les illites. [4]

- Sables au silicate de soude

L'incorporation de 3% à 4% de silicate de soude est utilisée pour la confection de grandes séries de moules et de noyaux **et assurer ainsi une certaine rigidité**. Ces mélanges sont durcis, soit par injection de gaz carbonique, soit par incorporation de laitier de haut fourneau, soit par des esters organiques.

- Sables au ciment

L'incorporation de 8% à 10% de ciment (généralement du ciment Portland) est utilisée pour la confection de moules de grande dimension. La vitesse de la prise peut être accélérée par des adjuvants appropriés.

- Sables à la résine

Les résines sont utilisées à faible dosage, de l'ordre de 2%, comme liant organique.

On distingue plusieurs familles :

- Les huiles siccatives (l'huile de lin) durcies par étuvage ou par adjonction d'un catalyseur d'oxydation (oxyde de manganèse ou de cobalt).
- Les résines thermodurcissables durcies en présence d'un catalyseur acide et d'une température de 200°C à 300°C. La prise du mélange est très rapide, ce qui est intéressant pour les grandes séries.

Résines phénol-formol (procédé « Croning »)

Résines urée-formol-phénol (procédé « Boite chaude »)

Résines furanniques (mélange urée-phénol-alcool furfurylique)

- Les résines polymérisant à froid (résines furanniques, résines polyuréthanes) durcies par des acides forts ou des injections de produits aminés.

Résines polyuréthane (mélange de phénol et isocyanate procédé « Croning »)

- Divers adjuvants (houille pulvérisée, farine de bois, sucre, mélasse).

Les quelques compositions de sables de moulage trouvées dans la littérature sont reportées dans le tableau n°2.

	Sable silico-argileux	Sable à noyaux	Sable à noyaux
Silice	88,7	98,8	98,2
Bentonite sodique activée	6,7	--	--
Noir minéral	1,2	--	--
Eau	3,4	--	--
Résine polyuréthane	--	1,2	--
Résine phénolique	--	--	1,8

Tableau n°2 : Exemples de composition de sable de moulage (Aron et al.,1993).

2. Les sables usés.

Les sables usés, disponibles pour une réutilisation en technique routière, résultent du traitement thermique des sables de moulage à haute température (parfois plus de 1000°C) lors de la coulée du métal en fusion suivie d'un traitement chimique par des adjuvants (huile, noir de carbone ...) afin de faciliter le démoulage des pièces.

Etant donné que les sables usés sont des résidus de calcination d'un mélange quasi-inerte thermiquement, ils présentent des caractéristiques minéralogiques et pétrographiques semblables à celles des sables de moulage d'origines (Platret et al., 1984).

Les sables usés sont essentiellement constitués de quartz [SiO₂] accompagné d'une faible proportion d'argile (1 à 5%), sous forme de bentonite [5] (mélange de montmorillonite, micacés et kaolinite [6]), et accessoirement de chromites [(Mg,Fe)Cr₂O₄]. Dans certains cas, on peut détecter des traces d'adjuvant de démoulage tels que le noir de carbone ou des produits organiques de toutes natures (paraffines, graisses aux silicones-esters, sulfonates,...).

Il est important de signaler que les sables usés peuvent également contenir un certain nombre de corps étrangers (billes de métal, bavures, supports de noyaux, ...), si les déchets issus du traitement de régénération des sables de moulage (déchets métalliques, refus de criblage, dépoussiérage) ne sont pas convenablement gérés et stockés par type ou famille. [7] Auparavant et dans les vieux stocks de sables à proximité des usines (désignés également crassiers), tous ces déchets étaient mélangés avec les sables usés. Actuellement, cette pratique disparaît au profit du tri sélectif et d'une recherche de valorisation des déchets.

3. Particularités des sables au contact des métaux.

Les sables usés peuvent contenir des quantités importantes de métaux lourds, comme le nickel et le chrome, deux éléments ~~d'alliage~~ fréquemment rencontrés dans les aciers. En effet, la coulée du métal en fusion à haute température dans le moule peut générer des transferts de substances potentiellement dangereuses ~~solubles~~ entre l'alliage (mélange optimisé de multiples métaux) et le sable de moulage.

4. Particularités des sables à la résine.

Certains sables usés, issus des sables de moulage à la résine, peuvent contenir des matières organiques plus ou moins dégradées par la coulée, dont la présence de phénol.

Les textes réglementaires imposent une détermination de l'indice phénol (méthode de dosage NF T 90-112) sur le lixiviat obtenu par la méthode de lixiviation X31-210 à partir d'échantillons représentatifs. Selon les résultats de cette analyse, [l'arrêté du 16 juillet 1991](#)

précise la filière d'élimination des sables usés. Cependant, la valorisation des sables usés n'est autorisée que si la teneur en phénols est inférieure à 5 mg/kg.

5. Essais électrochimiques.

Une étude électrochimique a été réalisée afin d'examiner l'agressivité des extraits aqueux de sables d'origine et de sables usés (2 à base d'argile et 6 à la résine) sur des éléments métalliques (fonte grise, fonte ductile, acier galvanisé). Les mesures des résistances de polarisation et les tracés de courbes potentiocinétiques ne révèlent pas un risque de développement de corrosion des conduits d'adduction d'eau ou d'assainissement en contact direct avec des sables d'origine et des sables usés. Ces derniers peuvent donc être utilisés sans risque de dommages en lors d'utilisation en remblaiement de tranchées (Loos, 1984).

Mais Compte tenu de la diversité des matériaux constituant les conduites métalliques enterrées, de la complexité des phénomènes de corrosion et de la qualité hétérogène des sables usés, cette étude recommande seulement de surveiller, pour une application particulière, les paramètres susceptibles de favoriser la corrosion : pH, gaz dissous, conductivité des sels solubles (Cl^- , SO_4^{2-} , ...).

La norme A05A05-252 de juillet 1990 (corrosion des métaux par les sols) précise les critères d'acceptation des matériaux de remblai au contact d'éléments de structure en acier au carbone en contact permanent avec ces remblais.

Caractéristiques géotechniques

Sommaire :

1. Sables usés bruts

2. Sables usés traités aux liants hydrauliques

1. Sables usés bruts.

L'industrie de la fonderie utilise des sables de silice très propres et de granulométrie parfaitement définie au niveau de la forme des grains (la plus arrondie possible), de la répartition granulaire (peu étalée) et de la finesse (entre 0,1 et 1mm).

Les sables usés présentent également une granulométrie peu étalée, comprise en moyenne entre 200 et 400 μm , mais qui peut être perturbée aux deux extrémités de la courbe granulométrique (figure n°3) :



Figure n°3 : Exemple de distribution granulométrique de 2 sables usés (CETE Nord Picardie, 2002).

- Les gros éléments correspondent à des inclusions métalliques ou à des morceaux de moules non détruits. La présence de ces éléments dépend du procédé de

récupération des sables usés de chaque usine et des conditions de stockage de tous les déchets générés lors du recyclage des sables. Les refus de criblage sont parfois réintroduits dans le stock de sables usés.

- Les fines proviennent du système de dépoussiérage des ateliers ou de l'incorporation d'argile (1 à 5%) comme liant dans la conception du sable de moulage. Ce paramètre peut faire varier dans de grandes proportions la propreté des sables usés, traduite par les paramètres PS_[8] (P 18-597 Détermination de la propreté des sables) ou VB_[9] (EN 933-9 Essai au bleu de méthylène).

	Sable grenailage	Sable de moulage	Sable de d'ébarbage	Sable au phénol
Passant à 2mm	100%	99%	100%	100%
Passant à 80µm	7%	12%	1,7%	10%
Valeur au bleu (g pour 100g de fines)	1,3	14,6	1,25	14
Optimum Proctor Normal [10]	1,53	1,71	1,67	1,8
Teneur en eau	14,5%	15%	17%	10%

Tableau n°3 : Exemple de caractéristiques ayant fait l'objet d'utilisations en technique routière.

La classification des sables usés se fait selon la norme NF P 11-300 de septembre 1992. Classés dans la famille « F₉ : Autres sous-produits industriels », les sables usés peuvent être assimilés, en terme de comportement, aux classes des matériaux naturels, sous réserve de vérification au cas par cas :

- ⇒ Sables à l'argile : Classe-classe B₂ à B₅.
- ⇒ Sables au silicate : Classe-classe B₁ à D₁.
- ⇒ Sables aux liants organiques : Classe-classe B₁ à D₁.

La portance des sables usés s'apparente à celle des sables fins et sablons. Difficilement traficables à l'état sec, ils deviennent impraticables à l'état saturé. Aux deux bornes de la plage des teneurs en eau, les engins de chantier poinçonnent et s'enlisent dans la couche en cours de mise en œuvre. Il convient de maintenir une teneur en eau suffisante, à définir au cas par cas, permettant à la fois une bonne traficabilité et une bonne compacité.

La nature du sable de moulage et la gestion ultérieure des sables usés (mélange éventuel avec d'autres matériaux) conduisent à des variations importantes en terme de référence de compactage. Il importe donc, avant tout chantier important, d'identifier les lots de même provenance afin de bien situer leurs caractéristiques de mise en œuvre.

2. Sables usés traités aux liants hydrauliques.

Les études de traitement aux liants (laitier, chaux, ciment) mettent évidence que la présence dans les sables usés de divers produits minéraux et organiques, plus ou moins détruits par la coulée, peut modifier la prise hydraulique jusqu'à un un-son blocage total (Brouwet et al., 1985). De plus, ces mélanges présentent des comportements très différents :

- suivant l'origine du sable usé pour un même liant ;
- suivant le liant pour une même origine de sable de moulage.

Etant donné le manque d'information sur la nature du liant et la difficulté de recenser toutes les interactions possibles, le retour d'expérience des études du réseau des LPC préconise une étude systématique préalablement au chantier, pour :

- tester les dosages dans la formulation envisagée (sable usé/sable correcteur/ciment/eau) ;
- comparer les résultats (temps de prise et résistance à la compression) à ceux obtenus sur une formule témoin ne contenant pas de sable usé.

Cette approche permet d'éviter les risques d'incompatibilité avec un sable usé susceptible d'emploi en assise de chaussée (tableau n°4) et de valider le choix du liant hydraulique disponible sur le marché (Vecoven et al., 1990).

Rc (MPa) [11]	Sable d'origine	Sable de moulage avant coulée		Sable de moulage après coulée	
		R _{témoin}	R ₁	R ₁ / R _{témoin}	R ₂

7j	0,87	0,82	0,94	0,63	0,72
12j	1,22	1,06	0,87	0,80	0,65
28j	1,73	1,56	0,90	1,09	0,63

Tableau n°4 : Etude préalable d'un sable usé traité au ciment (source LRPC Autun).

Caractéristiques environnementales

Sommaire :

1. Source de polluants

2. Traitement des sables phénolés

Le producteur de sable usé a obligation de le contrôler suivant les principes définis dans l'arrêté du ministre de l'Environnement du 16 juillet 1991. Sous sa responsabilité, il doit garantir la teneur en phénols telle qu'elle est prescrite dans ~~l'arrêté ministériel~~ même arrêté ~~ici~~ pour les sables de fonderie valorisables, c'est à dire inférieure à 5mg/kg.

1. Source de polluants.

Afin de se prémunir contre des risques de pollution, le réseau des LPC^[12] (Vecoven et al., 1982) et le Centre Technique des Industries de la Fonderie (Campagne d'essais CTIF^[13], 1982) ont mené des *essais de percolation* et de *lixiviation* sur des stocks de sables usés, bruts et brûlés, représentatifs des divers procédés de moulage et de noyautage. Les résultats des investigations ont montré que ces sables pouvaient être considérés comme des déchets industriels banals au sens de l'Instruction Technique du 22 janvier 1980 et être utilisés en remblai ou en couche de chaussée (Devaux et al., 1984).

Néanmoins, il arrive que les sables usés soient dépourvus de phénols, mais qu'ils soient plutôt pollués par des additifs en quantité notable (huiles, résines, agents mouillants, ...) ou par des éléments solubles (Fluor, Cyanure...). Ils peuvent également contenir des quantités importantes de métaux lourds, comme le nickel et le chrome, deux éléments d'alliage fréquemment rencontrés dans les aciers. En effet, la coulée du métal en fusion à haute température dans le moule peut générer des transferts de substances dangereuses entre l'alliage (mélange optimisé de multiples métaux) et le sable de moulage.

En cas d'acceptation d'un stock de sable usé, il est donc vivement recommandé de ne pas se limiter au seul indice phénol et d'élargir les indicateurs de pollution à d'autres paramètres tels que :

- → Le pH ;
- → La conductivité des éluats ;
- → La teneur en matières organiques (DCO, DBO et COT) ;
- → Le dosage des ions solubles (Na, NH₄⁺, Cl⁻,...) et métalliques (Fe, Cu, Zn, Al, ...).

Le tableau n°5 recense les différentes catégories de substances, éventuellement présentes dans un sable usé et parfois dangereuses, dont le taux peut considérablement varier selon le procédé de moulage ou le type d'alliage à mouler.

Nature de la substance	Origine de la substance	Commentaires
Indice phénol	Liant à base de résine phénolique	Dosage obligatoire Arrêté du 16/07/1991
Matières organiques	Liant à la résine organique	Le taux varie entre un sable brut et un sable brûlé
Métaux solubles	Nature de l'alliage coulée	Ex : Fe, Cu, Mg, Zn, Pb,...
Autres éléments solubles	Nature des additifs Décomposition des liants organiques Solubilisation des liants minéraux	Ex : Fluorure, Ammonium, ... Ex : Cyanure, ... Ex : silice Silice, alcalins Alcalins, ...

Tableau n°5 : Liste des substances éventuellement présentes dans un sable usé.

Le retour d'expérience du réseau des LPC (Vecoven, 1985) a mis en évidence qu'un traitement aux liants hydrauliques (ciment et laitier prébroyé activé à la chaux) peut fixer des

polluants (fer, ammonium) et limite leurs relargages dans les eaux d'infiltration. Cependant, ces observations restent limitées à quelques études particulières et elles doivent être confirmées par un examen spécifique à chaque chantier.

2. Traitement des sables phénolés.

Etant donné que la législation européenne impose une réglementation de plus en plus stricte pour la mise en décharge des déchets, les industriels de la fonderie tentent actuellement de développer des alternatives technologiques au stockage des sables contenant des résines phénoliques. Un programme de recherche unissant la Division Fonderie du groupe Renault et le BRGM a porté sur l'étude d'un procédé d'inertage des sables phénolés par biodégradation en présence de micro-organismes rigoureusement sélectionnés (Gillaizeau et al., 1999). Ces travaux ont permis de concevoir une installation industrielle pour ~~déphénoliser~~ ~~déphénoler~~ ¹⁴¹ des sables usés, même très riches en phénolés, en dessous du seuil d'acceptation de l'arrêté du 16 juillet 1991 et ~~d'envisager~~ ~~espérer~~ des traitements ~~en~~ ~~à~~ plus grandes quantités échelle. Afin de valoriser ce type de sable usé dont l'indice phénol à l'origine est supérieur à 5mg/kg, d'autres industriels (Margoux et al., 2000) ont étudié l'influence de leur incorporation en sous-couches routières sur les caractéristiques mécaniques de formules de matériaux traités aux liants hydrauliques.

Comme ces études montrent que l'utilisation de ces sables usés dans les structures de chaussée est sans risque et sans dommage pour les performances et la durabilité de l'ouvrage, le procédé de diminution de la teneur en phénol par traitement biologique ouvre la possibilité de valoriser en technique routière la presque totalité de sables de moulage produits par les fonderies (sables contenant jusqu'à 50 mg de phénols par kg).

Aspects sanitaires

Pas d'information disponible actuellement sur ce thème.

Utilisation dans les infrastructures routières

Sommaire :

- 1. Utilisation en remblais**
- 2. Utilisation en assise de chaussées**
- 3. Utilisation dans les techniques d'enrobés**
- 4. Problèmes spécifiques à l'utilisation des sables usés**

1. Utilisation en remblais.

Sous réserve d'une teneur en phénols dans les lixiviats inférieure à 1 milligramme par kilogramme de sable rapporté à la matière sèche, les sables usés peuvent être utilisés pour constituer des remblais routiers, des plates-formes industrielles ou pour combler des tranchées. Le guide technique pour la réalisation des remblais et des couches de forme classe ce matériau en F₉.

En raison de leur granulométrie homométrique, les sables usés ne présentent pas une bonne cohésion propre et peuvent poser des problèmes de traficabilité. Le retour d'expérience sur des chantiers expérimentaux, suivi par le réseau des LPC (Vecoven et al., 1982), a permis d'établir quelques précautions d'emploi :

- ~~Un-un~~ contrôle de la teneur en eau dans les sables, comprise entre 10 et 15%, permettant une mise en œuvre optimale ;
- ~~Un-un~~ compactage moyen à l'aide d'engins vibrants ou à pneus ;
- ~~Une-une~~ protection des talus (sol très érodable) par placage de terre végétale engazonnée pour lutter contre le ravinement et les ruissellements d'eau ;

- ~~→ Une-une~~ mise en œuvre d'une couche de forme mince pour assurer la traficabilité de surface.

Par ailleurs, l'utilisation de tels sables est interdite pour le remblaiement de carrières et d'excavations lorsque des interactions avec les eaux souterraines sont possibles.

2. Utilisation en assises de chaussées.

Sous réserve d'une teneur en phénols dans les lixiviats inférieure à 5 milligrammes par kilogramme de sable rapporté à la matière sèche, les sables usés peuvent être utilisés comme correcteurs granulométriques à dosage modeste dans des mélanges destinés à des assises routières. Le retour d'expérience sur des chantiers expérimentaux, suivi par le réseau des LPC (Genet et al., 1996), a permis de tester, sans problèmes particuliers, des mélanges contenant des sables usés jusqu'à :

- 15% dans une grave non traité ;
- 15% dans un sable traité aux liants hydrauliques ;
- 20% dans une grave traitée aux liants hydrauliques.

Il est important de s'assurer que la présence de produits organiques n'a pas un effet inhibiteur sur certains liants hydrauliques routiers.

Quelles que soient la technique de chaussée envisagée, la maîtrise de la qualité des sables usés (origine, conditions de stockage, granularité, argilosité,...) est prépondérante. Toute variation notable aura une incidence sur les performances du produit fini.

3. Utilisation dans les techniques d'enrobés.

Sous réserve d'une teneur en phénols dans les lixiviats inférieure à 1 milligramme par kilogramme de sable rapporté à la matière sèche, les sables usés peuvent être utilisés comme constituant en substitution partielle du sable traditionnellement incorporé dans les formules d'enrobé.

Une étude de faisabilité, réalisée par le réseau des LPC (Genet et al., 1996), a eu pour objectif d'appréhender l'incidence d'un sable usé, incorporé à 10% dans une formule, sur le comportement d'un enrobé. Il en résulte un enrobé beaucoup plus maniable (essai PCG), de compacité plus élevée (essai Duriez [15]) et de faible résistance à l'orniérage [16] par rapport à une formule de béton bitumineux de caractéristiques connus.

En limitant le domaine d'emploi sur des revêtements peu circulés (voirie de lotissement, trottoirs, parking VL, cour, ...), les sables usés peuvent être incorporés dans des matériaux traités aux liants hydrocarbonés.

4. Problèmes spécifiques à l'utilisation des sables usés.

Compte tenu de la quantité variable de sables usés rejetés par une usine (de quelques tonnes à plusieurs milliers par an), il est important de signaler qu'un tel débit de production de sable usé ne permet pas d'alimenter directement un chantier routier. Pour certaines fonderies, la production annuelle de sables usés risque même d'être consommée en un ou deux jours.

Il convient de travailler obligatoirement avec un stock tampon et de l'identifier avec rigueur. Les essais d'identification permettront d'établir une Fiche Technique Produit conforme à la norme XP P 18-540. Néanmoins, les flux individuels, faibles et réguliers, peuvent conduire à des travaux d'importance faible à moyenne.

Concernant les stocks de vieux sables usés, l'excès d'eau consécutif aux intempéries ainsi que le développement abondant de végétation (herbes, roseaux, ...) nuit au recyclage de ces matériaux. Un aménagement de l'aire de stockage et une protection superficielle du matériau permettent de mieux contrôler ces deux paramètres.

Sources sur le territoire français

D'une manière générale, il est difficile d'avoir des estimations précises sur le gisement des différentes catégories de sables usés de fonderie. Néanmoins, il est possible d'obtenir des informations auprès des organismes suivants :

- → Les Directions Régionales de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE^[17] : www.drire.gouv.fr) effectuent un recensement des productions de déchets et des ressources disponibles en matériaux de substitution dans leurs régions respectives (tableau n°6) dans le cadre des plans régionaux d'élimination des déchets industriels spéciaux (PREDIS). L'objectif des PREDIS est de définir les besoins en matière de traitement afin que chaque région dispose à terme des installations et des capacités de stockage nécessaire à l'élimination de ses propres déchets. Néanmoins, ces données englobent toutes les catégories de sables usés, aussi bien celles traitées en centre de stockage spécialisé que celles valorisables.

Région	Tonnage par an	Année de référence
Alsace	21 500	1996
Haute Normandie	25 000	--
Lorraine	10 000	--
Nord - Pas de Calais	80 000	1996
Pays de la Loire	53 900	1998

Tableau n°6 : Ressources disponibles de sables de fonderie (source PREDIS).

→ Les organismes professionnels de la fonderie (tableau n°7) disposent de bases de données bibliographiques et techniques sur le recyclage des sables usés. Cependant, ces informations ne sont accessibles qu'à leurs membres.

Organismes professionnels de la fonderie	Site internet
Les Fondateurs de France	www.fondateursdefrance.org
Association Technique de Fonderie (ATF)	www.atf.asso.fr
Centre de développement des industries de mise en forme (CTIF)	www.ctif.com

Tableau n°7 : Liste des organismes professionnels de la fonderie.

Comme les sables usés sont des sous-produits de l'industrie de la fonderie, il est important de rappeler les notions suivantes :

- ils proviennent des mêmes zones géographiques que les fonderies ;
- le volume à recycler est directement lié à la capacité et aux cadences de production des pièces de fonderie ;
- leurs caractéristiques dépendent du type de pièce à mouler.

En 1994, ce secteur industriel (au code F53 de la nomenclature des activités françaises englobant la fonderie des métaux ferreux et celle des métaux non-ferreux) était composé de 480 entreprises dont la moitié a moins de 20 salariés. La taille modeste de la plupart des fonderies couplée à une dispersion sur l'ensemble du territoire n'est pas favorable à l'utilisation des sables usés comme source pérenne d'approvisionnement de matériaux par la faiblesse et la diversité des stocks disponibles. Néanmoins, la région Nord Pas de Calais s'est dotée de deux installations spécialisées dans la préparation des sables de fonderie pour une valorisation en BTP.

Concernant les grosses installations de fonderie (tab.8), la consommation annuelle de sable ne peut générer que d'importantes ressources, de qualité régulière, en sables usés. Etant donné les enjeux (économique, social et environnemental) sur le traitement des déchets, ces groupes industriels (Renault, Peugeot, ...) ont désigné des responsables pour manager les questions environnementales, souvent dans une perspective de développement durable. Dans ces conditions, les sources d'approvisionnement en sables usés pour un recyclage dans les infrastructures routières dépendent directement de la stratégie de valorisation de chaque industriel.

Établissements	Commune		Consommation de sable Tonnes par an
Citroën	Charleville	59	40 000
Françaises de mécanique	Douvrin	59	40 000
Peugeot	Sochaux	25	33 000
Peugeot	Sept Fons	03	26 000
Saint-Gobain	Pont à Mousson	54	23 000
Renault Véhicule Industriel	Vénissieux	69	22 000
Société Bretonne de Fonderie et de Mécanique	Caudan	56	18 300
Manoir Industries : Sambre & Meuse	Feignies	59	13 000

Tableau n°8 : Liste non exhaustive des principales entreprises du secteur (source ADEME).

Emplois répertoriés

Le recyclage des sables usés en construction routière existe depuis les années 1980. Comme les fonderies sont présentes dans presque toutes les régions, de multiples chantiers expérimentaux (de faible importance et peu éloignés des lieux de production) ont été menés, par le réseau des LPC et les entreprises routières, mais le retour d'expérience n'est pas toujours formalisé dans des rapports ni disponible au public.

Aussi, les quelques rapports d'études, précisant les conditions d'emploi et disponibles dans la base de données OFRIR, sont les suivants: Hervy, 2000, Berard, 1986, Genet, 1998 et Chevalier, 1995.

Recherches en cours

Pas d'information disponible actuellement sur ce thème.

Bibliographie [18](#)

- Aron R., Briand Y., Verge J. (1993), Les sables de fonderie – Nature, régénération, recyclage, réutilisation, Document interne ADEME , Novembre 1993, 33p.
- BIPE Conseil (1996), ENVIROSCOPE – L'environnement dans les fonderies, juin 1996, 72p.
- Bernard, Vecoven J. (1986), Les sables de fonderie : Suivi du chantier CD 250 ISSANS RAYMANS, Compte rendu d'étude du LRPC de Autun, Février 1986, 16p.
- Brouwet J., Vecoven J., Moset (1985), Traitement des sables de fonderie par un liant, Compte rendu d'étude du LRPC de Autun, Juin 1985, 13p.
- Campagne d'essais CTIF (1982), Comité sols et déchets solides, Centre Technique de l'industrie de la Fonderie.
- Chevalier (1995), Utilisation de sable de grenailage de fonderie en remblai de tranchée, Compte rendu de planche d'essais Renault, 1995, 9p.
- Devaux P. (1984), Les sables de fonderie : Utilisation en technique routière, Compte rendu d'étude du LRPC de Strasbourg, Mai 1984, 17p.
- Devaux P., Vecoven J. (1984), Les déchets de sables de fonderie en technique routière, Bulletin de l'association Internationale de géologie de l'Ingénieur, n°30, 1984, (375-378) 4p.

Genet (1996), Valorisation des sables de fonderie en technique de chaussées : Etude de faisabilité, Compte rendu d'étude du LRPC de Autun, Juillet 1996, 15p.

Genet (1998), Bilan des études et suivi de chantier RN 81, Compte rendu d'étude du LRPC de Autun, Février 1998, 18p.

Gillaizeau O., Gallone T., Battaglia F., Dictor M.-C., Fourcher S. Hau J.-M., Morin D. (1999), Traitement biologique des sables contenant des résines phénoliques, Hommes & Fonderies, Avril 1999, n°292, pp18-20 3p.

Hervy S., Lefort M. (2000), Etude de valorisation d'un sable de fonderie phénolé, Compte rendu d'étude du LROP, Janvier 2000, 6p.

Loos G. (1984), Essais électrochimiques sur les sables de fonderie, Compte rendu d'étude du LRPC de Strasbourg, Mars 1984, 19p.

Margoux et al., (2000), Traitement par biodégradation des phénols dans les sables de fonderie en vue de leur valorisation dans les sous-couches routières, rapport final ADEME, Janvier 2000, 50p.

Platret G., Millet J., Witier P. (1984), Analyses des sables de fonderie, Compte rendu d'étude du LCPC Paris, Septembre 1984, 18p.

Predis (2002) Groupe e travail N°5 « améliorer la valorisation des déchets industriels en BTP ».

Vecoven J. (1985), Effets des polluants des sables de fonderie traités aux liants hydrauliques, Compte rendu d'étude du LRPC de Autun, Septembre 1985, 6p.

Vecoven J., Baillie (1990), Etude préalable de sables de fonderie traités au ciment, Compte rendu d'étude du LRPC de Autun, Février 1990, 7p.

Vecoven J., Fleury (1982), Les sables de fonderie : Usine Peugeot à Monbéliard, Compte rendu d'étude du LRPC de Autun, Février 1982, 27p.

Normes :

NF P 11-300 septembre 1992 ; classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

XP P 18-540 octobre 1997 ; Granulats : définitions, conformité, spécifications.

A05-252 juillet 1990 ; Corrosion par les sols – Aciers galvanisés ou non mis en contact de matériaux naturels de remblai (sols)

NF T 90-112 Détermination de l'indice de phénol

X 31-210 décembre 1992 ; Déchets – Essai de lixiviation

P 18-597 Décembre 1990 ; Granulats - Détermination de la propreté des sables : équivalent de sable à 10 % de fines

NF EN 933-9 Août 1999 ; Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 9 : qualification des fines. Essai au bleu de méthylène.

Page: 1

[\[1\] Qu'ajoute résiduaire?](#)

Page: 2

[\[2\] Glossaire](#)

Page: 6

[\[3\] Par clair expliciter.](#)

Page: 6

[\[4\] Comment peut-on différencier les caractères plus ou moins réfractaires des argiles? Doit-on en dire plus ou éviter la formulation de la phrase pour éviter toute ambiguïté?](#)

Page: 7

[\[5\] Le terme Bentonite est très précis et ne peut pas être un mélange, dans ce cas on parle de mélange argileux à composante bentonitique majeure.](#)

Page: 7

[\[6\] Voir supra](#)

Page: 7

[\[7\] Phrase à mon avis incomplète.](#)

Page: 9

[\[8\] Glossaire](#)

Page: 9

[\[9\] Glossaire](#)

Page: 9

[\[10\] Glossaire](#)

Page: 9

[\[11\] Glossaire et préciser en légende.](#)

Page: 10

[\[12\] Glossaire](#)

Page: 10

[\[13\] Glossaire](#)

Page: 11

[\[14\] En rapport avec le terme suivant, un néologisme doit être simple](#)

Page: 12

[\[15\] Glossaire](#)

Page: 12

[\[16\] Glossaire](#)

Page: 13

[\[17\] Glossaire](#)

Page: 14

[\[18\] Problème d'homogénéisation des références bibliographiques par rapport à un modèle utilisé pour tout les dossiers.](#)

Annexe 14

Schistes houillers

Avertissement

Genèse du charbon en France

Concernant la genèse du charbon je ne pense pas que le bassin de Gardanne-Fuveau qui produit du lignite soit d'âge carbonifère, je dirais tout au plus tertiaire et peut être oligocène à vérifier !

NF P11-300

Lien hypertexte ne marchant pas !

Dimensionnement des chaussées

FTP Glossaire !

Schistes Houillers

Résumé

Les schistes houillers sont les résidus de la séparation entre le charbon et le stérile qui l'accompagne lors de son extraction. Il n'existe pas de texte réglementaire spécifique couvrant leur utilisation. Les « schistes noirs » sont ainsi nommés à cause de leur faible teneur résiduelle en charbon. Ces matériaux ne sont plus actuellement produits (du moins en France), mais constituent des stocks sous forme de terrils (une vingtaine sont actuellement en exploitation, sur un total d'environ 500 sur le territoire français). Les terrils ont souvent été le siège de combustions spontanées, d'où une cuisson partielle (à des températures moyennes de 800°C), dont le degré détermine la catégorie finale du schiste (orange pour une combustion faible, rouge pour une combustion normale et violet pour une combustion extrême, qui va jusqu'à vitrifier le matériau). Lorsque le schiste d'origine est riche en calcaire, sa couleur reste grise, mais la cuisson fait apparaître des quantités significatives de chaux.

Les schistes houillers sont généralement constitués de schistes (provenant d'argiles métamorphisés), de grès, et d'éléments charbonneux pour les schistes noirs. Le schiste noir peut être utilisé tel quel (tout venant) ou après criblage (en coupure d/D avec $d = 16 \text{ mm}$, et $D \leq 160 \text{ mm}$ – catégorie « Formoschiste » - ou encore en 0/20). Ses propriétés mécaniques le réserve à un emploi en partie haute de remblai, pour le tout venant, ou en couche de forme (trafic limité à TC6[NCI1]) et en partie basse de remblai, pour le schiste criblé, moins sensible à l'eau. Le formoschiste, qui est un label correspondant à certains schistes criblés, obéit à des spécifications en termes de résistance au choc et à l'attrition humide.

Les schistes rouges concassés – aujourd'hui rares, malheureusement – ont des caractéristiques de granulats (classe E ou F selon la norme) et peuvent donc entrer dans la constitution de corps de chaussée peu circulées. Ils sont alors souvent traités aux liants hydrauliques.

Sur le plan environnemental, les schistes stockés en terril provoquent parfois un phénomène de drainage acide minier[NCI2], lié à l'oxydation naturelle des sulfures en sulfates. Le pH acide qui en résulte peut théoriquement favoriser le relargage de métaux lourds. On n'a pas cependant identifié le phénomène dans les nombreuses expériences passées d'utilisation en infrastructures routières (plusieurs dizaines de millions de tonnes en Nord-Pas de Calais).

Définition

Le terme **schistes houillers** est associé à l'extraction du charbon. Il est communément compris comme étant le sous-produit résultant de la séparation entre le charbon et le stérile qui l'accompagne inévitablement lors de son extraction dans la mine.

Plus de détails : [Genèse du charbon en France](#)

Textes spécifiques de référence

Les schistes houillers extraits des terrils sont considérés, actuellement tout au moins, comme des Matériaux naturels par les services ayant compétence en matière environnementale. En découle qu'il n'existe pas de textes réglementaires pour ce qui concerne leur impact sur l'environnement et leur incidence sur la santé humaine.

Cette situation peut être considérée comme a priori entérinée. Pour abonder en ce sens, il peut être mentionné que près de 250 millions de tonnes de schistes (Source : Terrils SA), toutes natures confondues, ont, depuis le début des années 60, été utilisées dans le Nord - Pas-de-calais au titre du BTP, sans inconvénients signalés en la matière.

Origine, formation et élaboration

Sommaire

1 Origine

2 Formation

3 Elaboration

1 - Origine

En raison même de sa genèse, le charbon, dans son gisement, se présentait généralement sous la forme d'une alternance de veines plus ou moins épaisses, séparées par des bancs intercalaires de terre (schistes). Ces veines sont quelque fois entrecoupées par de nombreuses failles.

Dans le bassin Centre Midiet [les Alpes région briançonnaire](#), à la suite de mouvements tectoniques, le charbon est parfois remonté vers la surface, permettant ainsi son exploitation à ciel ouvert.

Qu'il s'agisse d'une exploitation souterraine en galeries ou à ciel ouvert, cette disposition faisait, la mécanisation aidant, que des quantités importantes de stériles étaient extraites en même temps que le charbon. Pour ce qui concerne le bassin du Nord Pas de Calais, il était habituel par exemple de prendre en compte un diviseur de deux entre tonnage de charbon brut extrait et tonnage de charbon commercialisable (2 tonnes remontées pour une tonne vendue). Ces stériles qui accompagnent le charbon extrait sont communément désignés sous le vocable [Schistes](#)~~schistes~~.

2 - Formation (Séparation Charbon/Schistes – Combustion des schistes)

· Les schistes avant l'installation des lavoirs

« Au jour », les unités de tri avaient pour objectif de séparer, manuellement, d'une manière la plus discriminante possible mais imparfaite cependant, le charbon et les stériles.

Ces derniers, mis en dépôt, étaient désignés sous le vocable Schistes noirs. Autant dire que ceux-ci pouvaient contenir, notamment vers les éléments fins, un taux de charbon résiduel parfois élevé, expliquant ainsi leur combustion ultérieure ou, s'ils n'avaient pas brûlés, leur "relavage" pour récupération du combustible.

Au dépôt étaient également versés les matériaux provenant de l'exécution des puits de descente et des diverses galeries de communication permettant une gestion sécurisée du fond .

Plus de détails : [Schéma de valorisation des schistes de terrils carbonneux](#)

· Les schistes après l'installation des lavoirs

Bénéficiant de l'évolution des techniques de traitement et de préparation des minerais, les matériaux provenant du fond ont été ensuite systématiquement dirigés vers des lavoirs mettant en œuvre des bains de liqueurs denses qui, dans une première étape, permettaient de séparer, par flottation, les blocs de charbon des éléments stériles les plus grossiers.

A ce niveau du processus, les stériles récupérés étaient désignés par le terme *schistes de lavoir*. Par rapport aux précédents, ils présentaient un taux de charbon résiduel ainsi qu'une teneur globale en éléments fins faible à très faible.

Dans une seconde étape de leur process, les lavoirs permettaient de récupérer, à l'aide de tensio-actifs, les fines de charbon en suspension dans le fluide en circulation. Après essorage, ces dernières étaient ensuite utilisées comme combustible d'appoint dans des centrales thermoélectriques, dirigées vers des usines pour agglomération sous forme de boulets, briquettes.

Les éléments stériles issus de cette séparation, encore appelés *schlamms*, étaient rejetés par voie hydraulique dans des bassins de décantation. Pour se résumer, on peut dire que les schistes houillers sont constitués de terres de fosse, de schistes (de lavoirs pour les plus récents) et d'un peu de charbon (avec une présence quasi nulle pour les rejets les plus récents). Mis en dépôt, ces matériaux, de teinte noire au départ d'où l'appellation *schistes noirs* ont constitué les *Terrils* (Figure 1).



Figure 1 : Terrils

Ces terrils sont de forme conique quand les matériaux étaient déversés depuis un point haut au moyen d'un skip (transport par bennes sur rails), de forme plate lorsqu'ils étaient alimentés par wagons ou camions.

Certains de ces terrils, plats et de grande longueur lorsqu'ils supportaient des voies ferrées destinées aux besoins propres des différents bassins d'exploitation, étaient également appelés Cavaliers.

- Combustion des schistes

Ce phénomène a essentiellement intéressé les terrils de forme conique, quelques rares terrils plats ont cependant brûlé (Figure 2).



Figure 2 : Schistes rouges (après combustion)

Le déclenchement de la combustion, qui n'a rien de systématique, est tributaire à la fois d'une présence de charbon disséminée au sein de la masse et plus encore d'une possibilité

d'alimentation en oxygène. Ainsi, c'est souvent sous les vents dominants d'ouest que s'installe le début de montée en température qui ensuite gagne le cœur de la masse. Il est estimé que la température s'est établie en moyenne aux environs de 800° C à l'intérieur du terril. Certaines formes de silice (la cristobalite) laisse à penser qu'elle a pu atteindre les 1500°C en certaines zones.

Plus de détails : [Combustion](#)

Il est à noter que la combustion s'est avérée extrêmement aléatoire. Ainsi, certains terrils, riches en charbon, n'ont pas brûlé, d'où leur lavage ultérieur pour récupération du combustible (Delaume, 1997 ; LRPC Lille, 1978).

Après combustion, le terril montre parfois une très grande hétérogénéité. La cuisson s'y est bien souvent avérée incomplète, conduisant à des juxtapositions ou des alternances de masses plus ou moins importantes de matériaux présentant des différences de teintes très marquées. Elles sont l'indicateur de l'intensité du phénomène. Le niveau de combustion est généralement défini de la sorte :

- les *schistes noirs* : pas de combustion
- les *schistes oranges* : combustion partielle ou faible
- les *schistes rouges* : combustion normale
- les *schistes violets* : combustion importante ; le matériau est souvent désigné sous le vocable Vitrifié.

La teinte rouge à orange est due à la transformation des oxydes de fer présents dans les schistes noirs, comme dans les techniques de la terre cuite.

- Matériaux constitutifs des terrils

Au final, au fil du temps, l'exploitation du charbon a conduit, après séparation du combustible des stériles qui l'accompagnaient, à l'accumulation de Schistes houillers, le plus souvent sous forme de terrils coniques.

Selon la période de mise en dépôt et de l'installation d'une combustion, non systématique et plus ou moins intense, au sein de la masse, ces terrils sont composés, selon la désignation usuelle employée en la matière, de :

- schistes noirs pour les plus anciens,
- schistes de lavoir pour les plus récents,
- schistes rouges (ou schistes brûlés).

On peut noter les particularités suivantes :

- les houillères du Dauphiné ne disposent pas de schistes brûlés en raison de la nature du charbon exploité (anthracite contenant des matières volatiles difficilement inflammables et en faibles quantités),
- le bassin de Provence dont les schistes, de nature calcaire, ont conservé après combustion leur teinte grisâtre d'origine, tout en présentant une forte proportion de chaux.

3 Elaboration (Exploitation des terrils)

Les terrils (et non les Schistes), en tant que tels, sont exploités sous le double régime des Installations classées - ICPE et du Régime Général des Industries Extractives - RGIE, qui régit notamment l'émission de poussières. L'élaboration, ou plutôt l'exploitation du terril, consiste selon la nature du schiste, en la production des produits suivants :

- Terrils de Schistes Noirs
- Les Schistes Noirs Tout Venant

Ils sont l'objet d'une exploitation directe du vrac par système pelle-camion, avec, si besoin est, une discrimination et un contournement des zones de moindre qualité visuelle (granularité plus fine et/ou matériau d'aspect plus argileux). Selon les principes de [NF P11-300](#), les **Schistes Noirs Tout Venant** se classent en **F₃₂** : **Sols organiques - Sous produits industriels - Schistes houillers incomplètement ou non brûlés.**

*Sur le plan pratique, en fonction de leurs taux d'éléments inférieurs à 80 µm, de leur nature plus ou moins argileuse, qu'ils aient été ou non lavés, les Schistes Noirs Tout-venant peuvent être assimilés à la classe des matériaux **C₂B₂₂**, **C₂B₃₂** ou **C₂B₅₂** selon la terminologie de NF P11-300.*

- Le Formoschiste, le Schiste Noir Criblé et le 0/20 de Schistes Noirs

Ces matériaux résultent d'un simple criblage sur terril des meilleurs schistes noirs, estimés comme tels visuellement par les exploitants (figure 3).



Figure 3 : Exploitation des terrils

Le Formoschiste

Principe / Définition : Les schistes rouges aux qualités intrinsèques affirmées étaient traditionnellement utilisés pour la constitution des couches de forme des chaussées, notamment celles situées dans un contexte hydrogéologie défavorable (sol fin et nappe peu profonde). Devenant de plus en plus rares, ils sont maintenant dirigés en priorité vers les installations de concassage - criblage pour fabrication des sables et gravillons. Cette politique a conduit à une pénurie pour la fonction couche de forme.

Pour pallier ce déficit annoncé, des expérimentations de brûlage de schistes noirs ont été menées, avec succès. Les matériaux obtenus en fin de combustion, de teinte rouge, étaient peu différents en terme de qualité des schistes rouges naturels. Pour des raisons environnementales, cette pratique s'est cependant vite arrêtée à la demande des services administratifs compétents. Le formoschiste a donc pour vocation de remplacer le schiste rouge pour la fonction couche de forme, tout en le réservant à des structures peu à moyennement sollicitées en terme de trafic poids lourds. Elaboré à partir des meilleurs schistes noirs, il résulte de l'élimination, par criblage, de la fraction 0/16 mm (maille industrielle de faisabilité) et des éléments les plus grossiers. Le formoschiste doit répondre à un cahier des charges établi par la Société TERRIL S.A.

Caractéristiques de fabrication : Compte tenu de sa destination, mais plus encore peut-être de sa valeur marchande, il est juste demandé au formoschiste, de respecter des spécifications aux deux extrémités de sa distribution granulométrique (figure 4) , au

"D" pour des problèmes de compatibilité avec les épaisseurs de couche dans lesquelles il entrera, et au "d" pour des faisabilités industrielles liées à l'élimination des éléments argileux.

Il n'est donc pas question d'imposer un quelconque fuseau granulométrique dans l'intervalle d/D dans la mesure où ce matériau est issu d'un simple passage sur crible vibrant à deux étages.

Il doit répondre aux critères suivants :

- d = 16 mm
- D = 160 mm
- Refus-refus nul à 1.58 D (250 mm)
- Refus-refus à D et tamisât à d compris entre 1 et 20%
- tamisât à 80 µm < 5%

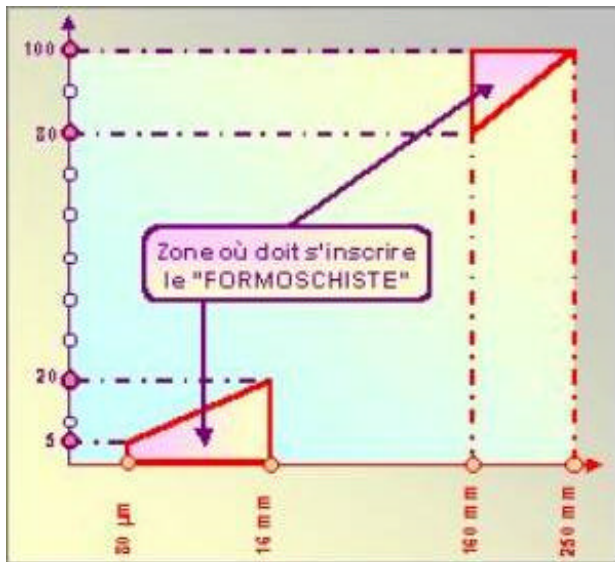


Figure 4 : Critère granulométrique

Le Schiste Noir Criblé

Dans la perspective de les rendre moins sensibles vis à vis de l'eau, les Schistes Noirs Tout Venant font l'objet d'un criblage visant à éliminer à la fois la fraction 0/20 mm (approximativement) et les plus gros blocs. Le Schiste Noir Criblé (SNC) ainsi obtenu se présente donc sous la forme d'un d/D, d se situant vers 16 à 20 mm et le D vers 150 mm, avec quelques rares éléments supérieurs à cette dimension.

Le Schiste Noir Criblé s'apparente à du formoschiste, en ce sens qu'il résulte du criblage, aux mêmes mailles que ce dernier, d'un Schiste Noir Tout Venant. Dans la mesure où il n'est pas contrôlé, il ne présente pas la garantie du formoschiste ni pour la distribution granulométrique, ni pour les caractéristiques intrinsèques.

Selon les principes de la norme [NF P11-300](#), les Schistes Noirs Criblés se classent en **F₃₂** : **Sols organiques - Sous produits industriels - Schistes houillers incomplètement ou non brûlés.**

Sur le plan pratique, en raison de leurs faibles taux d'éléments inférieurs à 80 μm, les **Schistes Noirs criblés** peuvent être assimilés à la classe des matériaux [D32](#) (matériau insensible à l'eau, D_{max} > 50 mm, VBS < 0,1, tamisat à 80 μm £ 12 %, LA > 45 et MDE > 45, selon la norme NF P11-300).

Le 0/20 de Schistes Noirs

Ils résultent de la production du formoschiste ou de celle des schistes noirs criblés. La production de l'un ou l'autre de ces deux matériaux revient globalement à diviser (environ 40% de 0/20 et 60% de formoschiste, les gros éléments étant marginaux) en deux parties le terril concerné, sachant que les éléments supérieurs à la dimension théorique de 160 mm sont peu nombreux.

Selon la nature du 0/D du terril initial, le 0/20 mm se classe en B3 – B4 (voire B5), selon les propositions de [NF P11-300](#).

- Terrils de Schistes Rouges
- Schistes Rouges Tout Venant

Ils présentent bien souvent un taux d'éléments inférieurs à 80 μm modéré qui, associé à un caractère argileux peu marqué, voire absent, en raison même de la combustion du matériau, conduit à les considérer comme insensibles vis à vis de l'eau.

Selon les principes de la norme NF P 11-300, les Schistes Rouges Tout Venant (SRTV) se classent en **F₃₁** : **"Sols organiques - Sous produits industriels - Schistes houillers complètement brûlés".**

Sur le plan pratique les **Schistes Rouges Tout venant** peuvent être assimilés à la classe des matériaux D₃₁ (NF P11-300).

Ils sont l'objet d'une exploitation directe du vrac par système pelle-camion, avec, si besoin est, une discrimination et un contournement des zones de moindre qualité visuelle (granularité plus fine et/ou matériau d'aspect cendreux, du fait d'une combustion imparfaite).

- Schistes Rouges Concassés

Ce sont les meilleurs des schistes rouges qui étaient ou sont encore concassés et criblés dans des unités permettant l'obtention des fractions granulaires les plus souvent demandées par le marché –(essentiellement des coupures 0/3, 0/6, 4/10, 6/20 et 10/20 mm).

Les installations spécifiques (Figure 5) sont dans la plupart des cas installées sur le terril. Elles sont toutes bâties sur le même mode, avec un concassage primaire puis secondaire et un crible à trois étages pour assurer les coupures marchandes demandées par le marché.

Les matériaux fabriqués sont principalement des :

- Sables 0/3, et 0[NCI3]/
- Gravillons 4/20, 6/20, 10/20
- Graves recomposées » 0/20 mm.

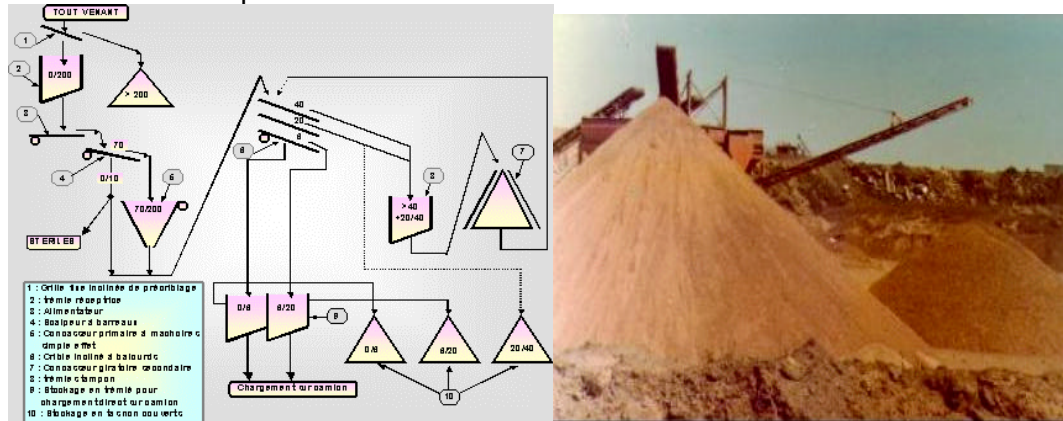


Figure 5 : schéma de principe d'installation de concassage de schistes rouges

Caractéristiques physico-chimiques

Selon les bassins d'exploitation et la situation géographique de l'exploitation dans ces derniers, les schistes peuvent présenter une diversité notable pour ce qui concerne leur composition. Pour celui des *HBNPC*[NCI4], on peut cependant la cadrer de la sorte : 20 à 50 % de grès, de 50 à 80 % de schistes provenant d'argiles métamorphisées et de 0 à 20% d'éléments divers plus ou moins charbonneux. Certains terrils, encore riches en combustible, ont été ou sont encore actuellement, lavés dans des installations spécialisées afin de l'extraire pour ensuite le diriger vers des centrales thermoélectriques.

Plus de détails : [combustible](#)

Une analyse au microscope polarisant fait apparaître les constituants suivants :

- Schistes noirs et oranges (combustion de faible intensité) : Quartz – Feldspaths – Mica - Argiles – oxydes de fer
- Schistes rouges et violets (combustion très vive) : Quartz – Cristobalite – Silicates d'aluminium – Silico-aluminates de magnésium – oxyde de fer – Matière vitreuse.

Selon les bassins houillers, la composition chimique des schistes (tableau 1) peut sensiblement varier. Pour ceux du bassin Nord-Pas-de-calais, elle s'inscrit dans les plages suivantes :

Silice	SiO ₂	45 à 55 %
Alumine	Al ₂ O ₃	25 à 30 %
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	5 à 8 %
Alcalins	Na ₂ O + K ₂ O	3 à 6 %
Chaux	CaO	0,5 à 1,5 %
Magnésie	MgO	1,5 %
Anhydride sulfurique	SO ₃	0,03 à 1%
Selon NF M 03-003 Octobre 1994 (par rapport au poids sec total initial)	7 à 20% sur le 0/D 15 à 30% sur la fraction 0/20 mm	

Tableau 1 : composition chimique des schistes.
Plus de détails : [Perte au feu sur schistes noirs](#)

Caractéristiques géotechniques

Sommaire

- 1 Les Schistes Noirs Tout Venant
- 2 Le Formoschiste
- 3 Les Schistes Noirs Criblés
- 4 Les Schistes Rouges Tout Venant
- 5 Les Schistes Rouges Concassés

1 Les Schistes Noirs Tout Venant

Comme leur nom l'indique, les schistes noirs tout venant ne font l'objet d'aucune préparation particulière avant d'être prélevés sur le terril pour ensuite être dirigés vers les lieux d'utilisation. Il n'y a aucune maîtrise de la granularité. Les rares blocs supérieurs à 300 mm environ sont cependant écartés au niveau de l'emprunt afin de rendre compatible le D du matériau avec l'épaisseur de la couche sous laquelle il sera mis en œuvre.

2 Le Formoschiste

Le formoschiste est un label déposé qui garantit une qualité requise telle qu'elle a été définie pour ce matériau (voir plus loin).

Le formoschiste étant théoriquement un 16/160 mm, les caractéristiques ont été mesurées sur la fraction 25/50 mm à l'époque de sa mise en place sur le marché. Le coefficient Micro Deval Adapté (MDA, décrit par la norme NF P 18 572) n'étant pas normalisé à l'époque sur cette fraction, c'est tout naturellement l'essai Deval Humide (DH), couramment exécuté à l'époque sur le ballast SNCF, qui a été choisi pour appréhender la résistance à l'attrition.

Les seuils retenus résultent des considérations suivantes (figure 6) :

- ~~des~~ Des chantiers expérimentaux ont permis d'apprécier la pertinence de la démarche avant que le matériau ne soit proposé en grand sur le marché. Cette phase a, par ailleurs, permis d'adapter les premiers seuils retenus suite à une identification de plusieurs terrils.
- La possibilité de produire le matériau en quantité suffisante pour satisfaire les besoins du marché, des spécifications trop dures en la matière auraient éliminés trop de terrils, réduisant à peu le gisement susceptible de produire du formoschiste.



Figure 6 : exemple de chantier expérimental

Pour être qualifié en tant que formoschiste, le matériau doit respecter les critères de qualité intrinsèques ci-après :

- Coefficient Los Angeles (LA), fraction 25/50 mm , LA \leq 55.
- Coefficient Deval (Dh) -,fraction 25/50 mm , Dh moyen = 1,2 (aucune valeur $<$ 1 n'est acceptée).

A noter que tous les terrils de schistes noirs, en raison de leur nature, ne sont pas aptes à produire du formoschiste.

Théoriquement F32, ce matériau peut être apparenté à la classe D₃₁ (matériau sensible à l'eau, D_{max} $>$ 50mm; VBS \leq 0,1; Tamisât à 80 mm \leq 12% - NF P11-300).

Dans le cadre de son utilisation et sous certaines conditions, un matériau D31 est réputé insensible vis à vis de l'eau dans le cadre des travaux de terrassement. Selon ce principe, il peut être utilisé pour la construction de toutes couches de forme de chaussées, même les plus sollicitées en terme de trafic.

Par ailleurs, indépendamment du trafic qu'aura à supporter la future voirie, l'utilisation du formoschiste en tant que matériau D31 sera également bornée par les conditions de mise en œuvre (conditions météorologiques défavorables) et d'organisations du chantier. Pour ce second point, les caractéristiques intrinsèques du formoschiste feront qu'il supportera difficilement un trafic intense et prolongé directement sur sa surface, d'autant plus si ce dernier est canalisé ou induit des efforts de cisaillement ou d'arrachement importants (rotation d'engins par exemple).

La prise en compte du formoschiste selon la classe D₃₁ ne peut donc s'envisager que dans une configuration où il sera peu sollicité en direct; ceci conduit à le recouvrir au plus tôt par la première couche structurante du corps de chaussées.

3 Les Schistes Noirs Criblés

Les Schistes Noirs Criblés (SNC) procèdent du même principe de fabrication que le Formoschiste à la seule différence qu'ils ne bénéficient pas d'un label et d'une garantie de qualité tant pour les caractéristiques physiques qu'intrinsèques.

Il est rappelé que c'est la nature de la partie 0/50 mm qui conditionne, selon la norme NF P11-300, la classification et en définitive le fonctionnement en terrassement d'un matériau au D développé :

- **C₂** : Matériaux anguleux dont la proportion de la fraction 0/50 mm \leq 60 à 80%.
- **B_{22, 32, 52}** : Matériaux au D \leq 50 mm⁽¹⁾, plus ou moins argileux en fonction de la valeur VBS[1] et présentant des coefficients LA et MDE $>$ 45.

Il n'est cependant pas exclu que certains schistes noirs, de nature gréseuse nettement affirmée, comme ceux de l'Est de la France, puissent présenter des taux de particules inférieures à 80 μ m faibles à très faibles ou tout moins inférieurs à 12%, permettant de la sorte de les assimiler à la classe **D32** (Matériau insensible à l'eau, D_{max} $>$ 50 mm ; VBS \leq 0,1 ; tamisat à 80 μ m \leq 12%, LA $>$ 45 et MDE $>$ 45), voire D₃₁ (Matériau insensible à l'eau, D_{max} $>$ 50 mm ; VBS \leq 0,1 ; tamisat à 80 μ m \leq 12%, LA \leq 45 et MDE \leq 45).

Dans le bassin des *HBL*, les schistes noirs concassés présentent des caractéristiques intrinsèques telles que (Source Sté SOLODET) :

- LA^[NCI5] sur fraction 25/50_{-i} » 45_i
- MDA^[NCI6] sur fraction 25/50 ~~mm-mm~~_i : » 26_i
- DH^[NCI7] sur fraction 25/50 mm_{-i} » 1,4_i
- LA^[NCI8] sur fraction 6/10 m _{-i} » 24_i
- MDE^[NCI9] sur fraction 6/10 ~~mm-mm~~_i : » 70_i

4 Les Schistes Rouges Tout Venant

Comme pour leurs homologues noirs, les Schistes Rouges Tout Venant (SRTV) ne font l'objet d'aucune préparation avant d'être extraits du terril et dirigés vers les lieux d'utilisation.

5 Les Schistes Rouges Concassés

Pour ce qui concerne les productions actuelles, il peut être considéré que les gravillons de Schistes Rouges Concassés (SRC) relèvent le plus souvent de la classe E, voire F, telles qu'elles sont définies dans l'article 7 de la norme XP P18-540.

Pour repère et information, on trouvera ci-après (tableau 2) quelques valeurs mesurés sur des gravillons de schistes rouges provenant de divers terrils du Nord-Pas-de-Calais, particulièrement représentatifs en terme de qualité, et aujourd'hui devenus rares.

Terrils (Mesure sur fraction 10/14 mm)	Los Angelès - LA	Micro Deval en présence d'eau - MDE
« Normalement rouge » n° 1	28 - 33 - 31 - 30 - 28 - 34 - 33 - 32 - 31 - 30 - 30 - Moy : 31	31 - 51 - 31 - 32 - 35 - 72 - 49 - 45 - 20 - 45 - 64 - Moy : 43
« Normalement rouge » n° 2	27 - 29 - 28 - 29 - 28 - 29 - 30 - 30 - 30 - Moy : 29	30 - 54 - 49 - 47 - 37 - 47 - 41 - 51 - Moy : 44
« Vitrifié / Violet » n° 1	31 - 34 - 34 - Moy : 33	28 - 26 - 25 - 18 - 22 - Moy : 24
« Vitrifié / Violet » n° 2	32 - 32 - 34 - 35 - 34 - 33 - 34 - 32 - 35 - Moy : 33	14 - 14 - 20 - 14 - 17 - 16 - 16 - 14 - 14 - Moy : 15

Tableau 2 : quelques valeurs mesurés sur des gravillons de schistes rouges.

Ces matériaux appartiennent aux classes D ou E telles qu'elles sont définies dans l'article 7 (Granulats pour chaussées : couche de fondation, de base et de liaison), de la norme XP P 18 – 540 (article 7).

Pour ce qui concerne les productions actuelles, il peut être considéré que les gravillons de schistes rouges relèvent le plus souvent de la classe E voire F.

Caractéristiques environnementales

Sommaire

1 Tests de lixiviation à pH contrôlé

2 Analyse des eaux au pied des terrils

Aucune étude publiée, française ou internationale, concernant des évaluations environnementales de l'utilisation de schistes houillers dans un ouvrage routier n'est disponible actuellement dans le cadre d'OFRI. La seule étude française pouvant être rapprochée de ce type d'utilisation est une thèse concernant l'impact de terrils houillers sur la qualité des eaux (Denimal-S., 2001). Bien que cela ne soit pas clairement précisé dans la thèse, il pourrait s'agir de schistes noirs au sens donné dans les paragraphes précédents (terril de la fosse Sainte-Henriette et des lavoirs centraux de la concession de Dourges, et terril des fosses 9, 9bis et 10 de Oignies). Cette étude (Denimal-S., 2001) concerne des terrils qui, d'une part sont exposés aux conditions atmosphériques notamment aux précipitations, et d'autre part sont stockés en très grande quantité sur une surface réduite ce qui favorise la concentration des composés relargués. Il s'agit donc de conditions très différentes de celles d'une utilisation en technique routière. Cependant, en l'absence d'études concernant cette utilisation spécifique, la thèse permet d'apporter quelques éléments d'informations. Elle cherche notamment à évaluer les effets éventuels du principal facteur de pollution provenant des mines et des terrils, connu sous le nom de *Drainages Miniers Acides* et largement étudié au niveau français et international (BRGM, 2002 ; Cammaer-G., 1998 ; Campbell R.N. & al., 2001 ; EPA, 1994 ; Foss-A., 1997).

Deux éléments d'information peuvent servir à en évaluer les effets potentiels : des tests de lixiviation à pH imposé, ainsi qu'une analyse des mares d'eaux de ruissellement au pied des terrils.

1 Tests de lixiviation à pH contrôlé

Ce type de test sert essentiellement à déterminer les paramètres influents (ici l'acidité) sur le relargage des composés chimiques, mais ne peut donner d'éléments quantitatifs prédictifs quant à une utilisation en technique routière (ou autre).

Le matériau est séché et broyé < 1 mm, puis est mis au contact d'une solution de pH déterminé, sous agitation pendant 48 h. Les tendances de relargage en fonction du pH sont données par composé dans le tableau 3. On constate, que tous les éléments analysés, excepté le sodium, le sulfate et l'arsenic, ont un relargage favorisé en milieu acide.

Élément / nom	Milieu acide pH bas	Milieu neutre 6 < pH < 8	Milieu basique pH élevé
Si / silice	↑	↓	↓
Al / aluminium	↑	↓	↓
Fe / fer	↑	↓	↓
Mn / manganèse	↑	↓	↑
Mg / magnésium	↑	↓	↑
Ca / calcium	↓	→	↑
Na / sodium	↓	→	↑
K / potassium	↑	↓	↓
Cl / chlore		?	
SO ₄ / sulfate	→	↑	↑
As / arsenic	→	→	↑
Ba / baryum	↑	↓	↓
Cd / cadmium	↑	↓	↓
Co / cobalt			
Sr / strontium	↑	↑	↓
Cr / chrome	↑	↓	↑
Cu / cuivre			
Pb / plomb	↑	↓	↓
Zn / zinc			

Tableau 3 : Tendances de relargage des éléments chimiques en fonction du pH sur un test de lixiviation, d'après Denimal S., 2001

2 Analyse des eaux au pied des terrils

Il s'agit d'une analyse des eaux de ruissellement (mares temporaires) issues des terrils. La figure 7 présente une comparaison entre l'eau de pluie initiale et l'eau ayant ruisselé sur les terrils. Elle permet donc d'observer l'apport ou la rétention de composés chimiques par les schistes stockés en terrils.

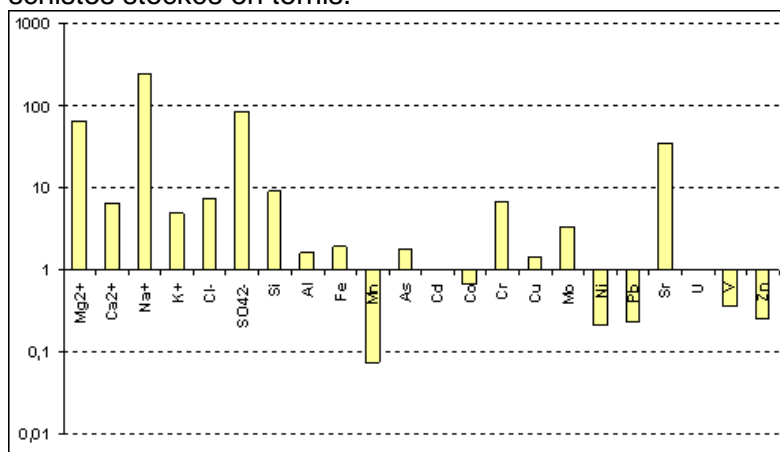


Figure 7 : Comparaison entre les concentrations mesurées dans les mares au pied des terrils et celles des eaux de pluies correspondantes - Graphique calculé à partir des données de

Denimal-S., 2001. Cette figure nécessite plus amples commentaire, l'axe des y correspond à quoi ? le graphique donné correspond à quel type de bilan de calcul ?

La Figure 7 permet de constater un enrichissement des mares au pied des terrils, par rapport aux eaux de pluies de l'ordre de 100 fois pour les éléments Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , et Sr, de l'ordre de 10 fois pour les éléments Ca^{2+} , K^+ , Cl^- , Si, Cr, et Mo. Elle met aussi en évidence un appauvrissement pour les éléments Mn, Co, Ni, Pb, V et Zn.

Les valeurs utilisées pour les calculs de la figure 7 sont précisées dans le tableau 4.

Elles permettent d'écartier, dans le cas des terrils étudiés, une éventuelle toxicité pour l'homme. En effet, les concentrations des métaux lourds répertoriés toxiques pour l'homme (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn), restent en dessous des valeurs réglementaires les plus basses, à savoir celles des eaux potables.

Eléments	Unité	Eaux des mares temporaires			Eaux de pluies		
		N°1	N°2	N°3	N°1	N°2	
Mg^{2+}	mg/L	49,56	50,66	9,24	0,89	0,25	
Ca^{2+}		57,39	29,37	27,34	10,78	1,25	
Na^+		1080,00	1086,00	19,49	4,59	1,32	
K^+		12,22	12,43	3,02	2,01	1,86	
Cl^-		52,60	51,20	9,10	7,92	2,17	
SO_4^{2-}		1400,00	1460,00	70,00	19,63	4,03	
Si		3,26	2,93	1,19	0,29	0,26	
Al		0,56	0,53	0,16	0,21	0,31	
Fe		0,35	0,18	0,16	0,13	0,11	
Mn		0,00	0,00	0,01	0,07	0,02	
As		µg/L	0,70	0,70	0,20	0,60	0,00
Cd			0,00	0,00	0,00	0,80	0,70
Co			0,10	0,00	0,20	0,10	0,20
Cr	7,50		7,20	0,50	1,20	0,30	
Cu	11,30		8,90	8,60	12,30	1,00	
Mo	0,20		0,20	0,10	0,10	0,00	
Ni	0,00		0,00	0,60	1,50	0,40	
Pb	0,80		0,00	1,00	2,40	2,80	
Sr	1423,80		579,10	154,80	33,20	7,60	
U	3,70		3,10	0,30	0,00	0,00	
V	0,30	0,30	0,20	0,50	1,00		

Tableau 4 : Concentrations des éléments dans les mares temporaires et dans les eaux de pluies correspondantes (Denimal-S., 2001)

Les teneurs en sulfates (SO_4^{2-}) et en ions sodium (Na^+) dépassent largement les seuils correspondant à une classification « orange » (mauvaise qualité des eaux superficielles selon la le Système d'Evaluation des Eaux de surface [NC110] qui est utilisé pour la classification des Agences de l'Eau), et celle en magnésium (Mg^{2+}) est très proche de la limite. Sodium et sulfates, ne sont pas considérés comme *écotoxiques*, mais en général, comme des indicateurs de la présence de composés qui le sont, ce qui explique les seuils fixés pour la qualité des eaux. Le magnésium n'est pas non plus *écotoxique*, mais sa présence favorise la toxicité d'autres composés tels que fluorures, cuivre, chlore, zinc, cadmium et mercure (MATE, 1999). L'absence de références réglementaires ne permettent pas de juger de la toxicité ou de l'écotoxicité éventuelles du fort enrichissement en strontium (Sr) constaté. [NC111]

Aspects sanitaires

Aspects sanitaires [NC112]

Utilisation dans les infrastructures routières

Sommaire

- 1 Utilisation en remblais
- 2 Utilisation en couche de forme
- 3 Utilisation en assises de chaussées
- 4 Autres utilisations des schistes

1 Utilisation en remblais

- Les Schistes Noirs Tout Venant

En raison de leur relative sensibilité vis-à-vis de l'eau, ils ne sont, en l'état, utilisables que pour la construction d'ouvrages en terre et plus précisément de remblais routiers. Dans le nord de la France, ils ont été utilisés en abondance à cette fin.

Tout en se référant au GTR - Guide Technique LCPC, SETRA (1992) pour définir la meilleure utilisation possible des Schistes Noirs Tout Venant en fonction du contexte hydro-géologique dans lequel ils seront intégrés, on privilégiera de préférence la mise en œuvre sous des hauteurs moyennes à importantes (accès à ouvrages d'art par exemple) pour conférer du monolithisme [NC113] à la masse ainsi mise en place .

Sous peine de rendre la mise en œuvre difficile, notamment par météorologie pluvieuse, il est recommandé d'écarter de toute utilisation, les schistes noirs dont les plus gros éléments présentent une propension avérée au délitement (aspect schisteux marqué, débit en plaquettes et/ou en fragments plats).

Pour les hauteurs les plus faibles, il est prudent d'éviter toute mise en œuvre en zone inondable,... à moins de les y soustraire en les asseyant sur un matelas de matériau insensible à l'eau, souvent établi à partir de schistes rouges miniers. L'utilisation de Schistes Noirs Criblés ou de Formoschiste est tout à fait possible dans ce cadre.

Les caractéristiques de cisaillement (c et j) [NC114] permettent de dresser les remblais sous des pentes de 2/3 (2 de haut pour 3 de base). La sécurité vis-à-vis du glissement de pente est ainsi largement assurée.

- Les Schistes Noirs Criblés

Les Schistes Noirs Criblés (SNC) seront utilisés préférentiellement en soubassement de remblais situés en zone inondable, ou en constitution de remblais, comme pour les Schistes Noirs Tout Venant.

- Les Schistes Rouges Tout Venant

Compte tenu de leur rareté, les schistes rouges tout venant sont peu ou pas utilisés pour la construction de remblais routiers, trop consommateurs de matériaux. Leur insensibilité vis à vis de l'eau peut être exploitée pour tout terrassement ou toute partie d'ouvrage en terre devant s'exécuter durant des intempéries ou résister à l'imbibition (zones inondables par exemple). L'utilisation la plus courante des schistes rouges tout venant dans le domaine du remblai est le soubassement de remblai en zone inondable

2 Utilisation en couche de forme

Pour dimensionner en toute connaissance de cause la couche de forme, on croisera les usages locaux avec les propositions formulées dans le GTR. L'expérience locale est un élément déterminant en la matière

- Le Formoschiste

Le Formoschiste a pour vocation de se substituer, sous certaines conditions, notamment de trafic, aux schistes rouges dans le cadre de la construction des couches de forme de chaussées. Les propositions concernant les schistes rouges peuvent être reprises dans le cadre de ces usages.

Il est nécessaire d'apporter une vigilance accrue à la qualité du matériau. Le formoschiste doit en effet répondre à l'ensemble des spécifications qui lui sont attachées, notamment dans le cadre de chaussées sollicitées.

Cependant, pour ce qui concerne le formoschiste, les errements actuels limitent son usage au trafic TC6 inclus (voir la définition de TC6 dans le Catalogue des structures types de chaussées neuves - Réseau routier national - Edition 1998).

- Les Schistes Rouges Tout Venant

Dans la région du Nord Pas de Calais, pour l'obtention d'une rigidité satisfaisante de la plateforme support de chaussée, il est habituel, sur un support limoneux humide et peu portant, de mettre en place une épaisseur de **Schistes Rouges Tout Venant** d'environ 0,60 m, avec, en complément, l'interposition d'un géotextile anticontaminant entre le matériau d'apport et le sol en place.

Leur insensibilité vis à vis de l'eau (au sens du terrassement) en fait un matériau de choix pour cette orientation. L'épaisseur de matériau à mettre en œuvre est fonction de la qualité initiale de la Partie Supérieure de Terrassement (PST), tant au moment des travaux qu'à plus long terme (pour ce dernier aspect, les possibilités de drainage doivent être prises en considération).

3 Utilisation en assises de chaussées

Plus de détails : [Dimensionnement des chaussées](#)

- Les Schistes Rouges Concassés

Les granulats 0/6 et 6/20 mm obtenus après concassage criblage du tout venant rouge sont pour les meilleurs en terme de caractéristiques intrinsèques utilisés pour la fabrication des mélanges routiers traités aux liants hydrauliques (NF P 98-116).

Cette utilisation, qui implique la connaissance des caractéristiques mécaniques des produits, est plus ou moins développée selon les bassins charbonniers.

Zone des HBNPC

On retiendra que **les schistes rouges**, à la date de rédaction du présent document, sont devenus rares dans ce bassin. Ceux encore disponibles présentent des qualités irrégulières et en diminution (combustion imparfaite, aspect plus ou moins cendreuse).

Au global, les gravillons issus des opérations de concassage-criblage ne présentent que très rarement les caractéristiques intrinsèques requises pour une utilisation en mélanges liés destinés à la construction de voiries sollicitées. Le liant hydraulique utilisé est généralement soit du laitier granulé de haut-fourneau, des cendres volantes silico-alumineuses, ou une association de ces deux liants (les graves mixtes).

Bien souvent, pour pallier à leur déficit quantitatif mais aussi qualitatif, les gravillons 6/20 mm sont de plus en plus souvent remplacés par des granulats de meilleure qualité, d'une autre nature, des gravillons de calcaire dur par exemple pour ce qui concerne le nord de la France.

Les mélanges évoqués ci-dessus font l'objet d'une norme de définition (composition, caractéristiques mécaniques, ...).

Il est raisonnable d'orienter préférentiellement les graves à base de schistes rouges vers la construction de structures de chaussées peu circulées (reconditionnement des cités minières par exemple).

Zone des HBL

Pour ce qui concerne le terril de Sainte Fontaine, les produits routiers liés tels que définis ci-dessus sont essentiellement fabriqués à partir de schistes noirs concassés (concassage de la fraction 50/150 mm du Tout ~~venant~~-Venant issu du lavoir) qui présentent des caractéristiques intrinsèques d'un niveau nettement supérieur à ceux rencontrés dans le bassin des HBNPC.

Les schistes noirs présentent des caractéristiques intrinsèques permettant de les utiliser en tant que granulats pour la fabrication d'une Grave-Grave Traitée au liant hydraulique (NF P98-116).

A partir de ces matériaux est fabriquée une Grave Laitier, baptisée Fondaschiste par la Société SOLODET qui en est le promoteur. Le Laboratoire régional des Ponts et Chaussées de Nancy en a étudié la formulation du produit et suivi les premières applications sur chantier (LRPC Nancy, 2000).

A partir de des schistes rouges concassés, il est également proposé en tant que produit routier une Grave Non Traitée 0/20 mm "GNT 0/20".

Zone des HBCM

Compte tenu de la présence de nombreuses carrières de calcaire à proximité, il n'y pas de propositions de produits routiers liés à partir du terril de la Grand'Combe.

4 Autres utilisations des schistes

Plus de détails : [Remblayage des tranchées](#)

Plus de détails : [Aménagements paysagers](#)

Sources sur le territoire français

Quelques travaux mentionnent la valorisation des schistes (Berthe, 1986 ; OCDE, 1997). En France, certains terrils, peu nombreux, sont la propriété de collectivités locales, de tierces personnes ou de sociétés de travaux publics. Cette situation est en passe d'évoluer radicalement dans la mesure où TERRIL SA a vendu, par mise à la concurrence, les matériaux des terrils en cours d'exploitation ou potentiellement exploitables ; les surfaces libérées en fin d'exploitation retournant aux collectivités locales ou à l'instance régionale. Un GIE gère à présent les terrils.

Les terrils qui sont actuellement et pour leur quasi totalité, la propriété de Charbonnages de France , se situent fort logiquement sur les trois bassins d'exploitation précédemment cités : Nord - Pas-de-Calais, Lorraine, Midi-Centre. Ils sont concédés pour leur exploitation à des entreprises diverses, liées au monde du BTP. Les terrils implantés dans le Nord-Pas-de-Calais, sont du ressort de la Société TERRIL S.A, ceux des deux autres bassins de la Société SURCHISTE.

Eu égard à l'arrêt de l'exploitation du charbon dans les toutes prochaines années, le Gisement Schistes n'est plus alimenté, ou que très partiellement en Lorraine. La ressource est donc appelée à se tarir dans un avenir plus ou moins rapproché.

Actuellement, environ 500 terrils sont recensés sur le territoire français. Ils représentent un potentiel théorique de près de un milliard de tonnes. Ils se déclinent de la sorte : 260 terrils pour 700 Mt dans le Nord Pas de Calais, 10 terrils pour 100 Mt en Lorraine et 230 terrils pour 200 Mt de tonnes dans le Centre-midi.

Pour des raisons multiples et variées, beaucoup d'entre eux ne seront jamais exploités. Citons pêle-mêle : image emblématique ou dimension historique pour la région concernée, colonisation complète, notamment arbustive, conduisant à une intégration totale et harmonieuse dans le paysage, présence d'espèces végétales particulières, plus méridionales et en relation directe avec le micro-climat chaud et humide du terril en combustion, trop grande proximité avec des habitations, qualité insuffisante du matériau.

Au final, par rapport à ce potentiel seront exploités ou exploitables :

Dans le Zone-zone des HBNPC

Une vingtaine de terrils environ y sont actuellement exploités, pour un potentiel de 100 millions de tonnes environ dont 2 à 3 millions de schistes rouges.

Dans la zZone des HBL

Très volumineux, 35 millions de m³, le terril de Sainte Fontaine, situé sur le territoire des communes de Fremyng-Merlebach (57), qui est le seul et unique terril en exploitation dans ce bassin. Après son épuisement, il n'y aura pas d'autres ouvertures de terrils. Constitué de schistes rouges et noirs, il est valorisé par la société SOLODET qui propose toute la gamme des produits évoqués au § 8 ci-dessus.

Dans la zZone des HBCM

On n'y recense qu'un seul terril en exploitation y est recensé, à La Grand'Combe (30). De dimension plutôt modeste, 2 millions de tonnes, il est constitué de schistes noirs et rouges. Après son épuisement, il n'y aura pas d'autres ouvertures de terrils.

Depuis peu sur ce terril des mâchefers de centrales thermiques ont été mis à jour. Mélangés avec du sable de schiste rouge, ils sont utilisés en tant que substrat dit élaboré pour terrains de grands jeux gazonnés. Ce terril est exploité par la société de travaux publics STTP.

Emplois répertoriés

Dans une région pauvre en matériau rocheux en raison d'une géologie essentiellement sédimentaire, les schistes houillers ont été utilisés d'une façon massive lors de la construction des remblais et couches de forme du réseau autoroutier et routier de la région Nord Pas de Calais (LRPC Lille, 1978 ; LRPC Nancy, 2001 ; Prédic Nord Pas de Calais, 2002). Plusieurs dizaines de millions de tonnes de matériaux ont ainsi été utilisés à ces fins.

Recherches en cours

Le développement attendu dans les prochaines années dans le Nord-Pas-de-Calais concerne essentiellement le traitement des schistes noirs tout venant par des ciments routiers aux fins de les utiliser pour la constitution des couches de forme de chaussées.

Le développement attendu dans les prochaines années dans le Nord-Pas-de-Calais concerne essentiellement le traitement des schistes noirs tout-venant par des liants hydrauliques routiers aux fins de les utiliser pour la constitution des couches de forme de chaussées.

Des études de laboratoire sur des schistes de lavoir (présence de sulfates plutôt faible par rapport à celle d'un schiste noir "standard") a montré tout l'intérêt de la démarche. Comme pour le sable de schiste 0/20, il est nécessaire avant de s'engager dans cette voie de vérifier l'aptitude au traitement (NF P94-100), mais aussi de s'assurer de l'homogénéité en grand du terril afin de ne pas encourir le risque d'aboutir à des produits aux caractéristiques mécaniques erratiques, l'argilosité ayant en la matière une incidence directe et importante.

La démarche en laboratoire devra s'organiser de la manière suivante :

- Détermination de l'âge autorisant la circulation sur la couche traitée. Cet aspect revêt une importance particulière dans la mesure où ce temps de mûrissement conduit à une neutralisation complète du chantier et en corollaire pèse sur le délai de réalisation.

- Détermination de la résistance à l'immersion au jeune âge. La couche de forme traitée peut être exposée aux intempéries durant un temps suffisamment long pour qu'une saturation complète s'en suive et réduise notablement et d'une façon durable les caractéristiques mécaniques escomptées.

- Détermination de la résistance au gel. Cette résistance est surtout importante au jeune âge dans la mesure où, là également, elle aura une incidence directe sur le planning des travaux. Le temps nécessaire au développement de la résistance au sein de la couche, capable de s'opposer aux efforts de traction consécutifs à la première période de froid, doit être pris en considération dans un planning de réalisation.

- Estimation des performances à long terme. Pour ce type de matériau pouvant contenir des sulfates, il est conseillé de mener les essais de résistance jusqu'à 360 jours plutôt que d'extrapoler à partir de résistances mesurées à un temps intermédiaire. Il n'est en effet pas impossible que les caractéristiques mécaniques, après avoir atteint un maximum à mi-parcours, déclinent ensuite, parfois notablement, en raison de réactions chimiques secondaires entre le liant et le schiste noir. La connaissance du niveau de performance atteint permet par ailleurs de classer le matériau et ainsi de définir plus précisément la structure de chaussée la mieux adaptée, en fonction de la nature et de l'intensité du trafic qu'elle aura à supporter.

* Cette démarche et les objectifs de performance qui y sont associés sont précisés dans le GTS.

*Si ces produits s'avèrent performants et surtout réguliers, il n'est par ailleurs pas impossible d'imaginer leur utilisation pour la constitution d'une partie des structures de chaussées peu sollicitées. Dans le cadre d'une telle utilisation, le schiste noir devra être "amené" à une fraction 0/20 mm, soit par réduction du matériau 0/150 mm initial, soit par simple séparation par criblage de la fraction basse concernée.

C'est ce qui est tenté actuellement dans l'Est de la France en raison d'une meilleure qualité intrinsèque des schistes noirs présents sur le terril de "Sainte Fontaine" - HBL, par rapport à ceux rencontrés dans la zone des HBNPC.

Les schistes noirs tout venant "TVN" de "Sainte Fontaine" sont depuis peu, concassés et criblés en vue de fabriquer, après recombposition granulométrique et ajout de laitier de haut-fourneau granulé, de la "Grave laitier" destinée aux couches de fondation et de base de chaussées ayant à supporter un trafic limité à T2.

Bibliographie[NCI16I](#)

Sommaire

1 Publications

2 Normes

3 Sites Internet où l'on parle des terrils, des schistes

1 Publications

BERTHE Michel : La valorisation des schistes houillers – Conférence présentée au Congrès SIM – Douai, 2 au 2 juin 1986.

BOINET jacques : Fabrication d'éprouvettes de schiste peu poreuses – Mesure de leur résistance et de celle de granulats industriels – Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux – n° 776 – 1/89.

Cammaer C., 1998 : Coal mining and ground water in Flanders (Belgium) - Aard. Meded, 9, 83-96, 1998.

Campbell R.N., Lindsay P., Clemens A.H. : Acid generating potential of waste rock and coal ash in New Zealand coal mines - Int. J. Coal Geol., 45, 163-179, 2001.

CERCHAR : Utilisation des stériles provenant de la préparation des charbons dans les pays du comécom (en polonais) par CZERWENKA.Z et WIATROK.H – Traduction n° 520-77 – Fiche E.693 – 88 331.

CERCHAR : Influence des feux de terrils sur les propriétés physico-chimique des stériles par BLASZCZYK . M et SLIWA . J – (en polonais) – Traduction n° 308-79 – Fiche E.692 – 93 773.

CERCHAR : Mise au terril et utilisation des déchets des houillères par BREALEY.S.C . (en anglais) - Traduction n° 63-84 – Fiche E.693 – 108 703.

BRGM, Drainages Miniers Acides, <http://www.brgm.fr/DMA/Default.htm>, 2002.

CERCHAR : Propriétés des stériles de charbon en génie civil (en anglais) par CHEN C.Y - Traduction n° 230-80 – Fiche E.693 – 96 511.

COURTAULT B, BRIAND J.P. , BOISSON G. : Etude des schistes houillers français – leurs utilisations possibles en cimenterie – Ciments, Bétons, Plâtres, Chaux – n° 740 – 1/83.

DE BRANDERE Gabriel : "Le Formoschiste, c'est quoi" –CETE Nord Picardie – Voirie magazine – n° 21 Janvier 1991.

DELAUME jacques : Le lavage sur site des terrils ou l'art d'accommoder les restes – Industrie minérales – Mines et Carrières – Mai 1987.

DENIMAL Sophie – Impact des terrils houillers du bassin minier Nord-Pas-de-Calais sur la qualité des eaux de la nappe de la craie – thèse de docteur de l'université de Lille I – 20 Décembre 2001.

EPA : Environmental Protection Agency - Acid Mining Drainage Prediction - Report n° 530-R-94-036, 48p, 1994.

Foos A. : Geochemical modelling of coal mine drainage, Summit County, Ohio - Env. Geol., 31, 205-210, 1997.

HANQUEZ Eugène – BERTHE Michel – NOEL Bernard : L'utilisation des schistes houillers – Revue générale des routes et aérodromes – NP 565 Juin 1980.

HANQUEZ Eugène : Utilisation des déchets industriels dans les travaux routiers – Industrie minérale – Janvier 1973.

Laboratoire Régional des Ponts et Chaussée de Lille : Comité de gestion de la taxe parafiscale – Détermination des limites d'utilisation des schistes rouges provenant des terrils des houillères – Septembre 1978.

Laboratoires des Ponts et Chaussées : Valorisation et élimination des déchets et sous-produits industriels et urbains – Journées et bilan de l'action de recherche n° 36 – L.R. Le Bourget 4 et 5 mai 1983.

LAURIER Philippe, GIRARDOT Roland : Les matériaux de substitution utilisables en génie civil – IREX - n° 21 Mai 1994.

LEMAIRE. M : L'incorporation de schlamms et de schistes houillers dans les masses pour briques – Silicates Industriels 1987 - 11/12.

MATE, Principaux rejets industriels en France - Annexe : Origine et effets des principaux polluants des eaux, 1999.

OCDE : Recherche en matière de routes et de transports routiers – Stratégie de recyclage dans les travaux routiers – 1997.

PREDIS Nord – Pas-de-Calais : Guides techniques régionaux relatifs à la valorisation des déchets et des co-produits industriels – Juillet 2002.

GTR : Guide Technique SETRA / LCPC de Septembre 1992 : " Réalisation des remblais et des couches de forme"

LRPC Nancy, 2001, Expérimentation du Fondaschiste

2 Normes :

NF P 98-116 : février 2000 : assises de chaussées, graves traitées au liant hydraulique : définition – composition-classification

XP P 18-540 – Granulats : Définitions, conformité, spécifications. Article 7 : Granulats pour chaussées : couches de base et de liaison

NF XP 31-210 : mai 1998 : déchets – essais de lixiviation

NF P11-300 : exécution des terrassements – classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières.

3 Sites Internet où l'on parle des terrils, des schistes

« Les travaux publics et l'environnement »

... Parmi celles-ci, certaines techniques de valorisation méritent d'être encouragées

: * Les **schistes houillers** : Provenant de l'exploitation charbonnière ...

http://www.fntp.fr/actualite/dossiers/TP_ET_ENVIRON._FNTP-DEXIA.pdf

DRIRE LORRAINE SREI PROGRAMME TRIENNAL D' ACTIONS 1999 - 2001 ...

... de substitution forts nombreux dans le département de la Moselle comme les laitiers anciens de hauts fourneaux stockés sur crassier, les **schistes houillers** ...

<http://www.lorraine.drire.gouv.fr/environnement/pdf/quatriTrimestre2001.pdf>

Fiches terrils

IDENTIFICATION. **Terrils** n° : 74 - 74 a - 74 b Nom usuel : **Terrils** du 11/19 Commune : Loos-en-Gohelle Département : Pas-de-Calais. DONNEES PHYSIQUES. Forme : Conique et tabulaire ; dépôts en...

http://chaine.des.terrils.free.fr/fiches_terrils11-19.htm

Géologie du bassin minier

L'activité des Houillères a rendu nécessaire l'accumulation de matériaux à proximité des puits d'extraction. Les terrils miniers formés sont alors des " décharges industrielles " ...

<http://chaine.des.terrils.free.fr/geologie.htm>

Histoire du charbon dans la région Nord - Pas de Calais

... CHARBON DU BASSIN HOUILLER DU NORD Les bassins **houillers** ... est dominé par les deux plus haut **terrils** ... de déchets issus des galeries: terres, pierres et **schistes** ...

http://www.nordmag.com/patrimoine/histoire_regionale/histoire_charbon/histoireducharbon.htm

Histoire du **charbon** dans la région Nord - Pas de Calais

Historique de la découverte du **charbon**, la mine et les mineurs dans le Nord - Pas de Calais

<http://www.nordmag.com/patrimoine/histoi...reducharbon.htm>

Houillères embrasées

Les terrils houillers ainsi que les massifs miniers eux mêmes peuvent entrer spontanément en combustion dans certaines conditions

http://cgineste.multimania.com/aveyron/h_embrasee.html

<http://www.cr-npdc.fr/instit/cesr-avis/telechargement/2001/101001rappeau.txt>

... Al'origine les terrains **houillers** ne sont pas aquifères. ... Un aquifère est en train de se constituer dans des matériaux fins, (**schistes**)

<http://www.cr-npdc.fr/instit/cesr-avis/telechargement/2001/101001rappeau.txt>

IL ETAIT UNE FOIS... LES CRASSIERS

IL ETAIT UNE FOIS... LES CRASSIERS. Prologue à un nouveau regard. Par Anne MICHAUD. " Parce qu'il faut savoir : un terril, ça reste pas là, comme ça. Ca marche... " Cavanna, Les enfants de...

<http://www.emse.fr/AVSE/michau1.htm>

Infotech Jean Lefebvre : Recyclage et valorisation

... LES **SCHISTES HOUILLERS** : Ce sont des stériles provenant de l'exploitation charbonnière qui se présentent sous deux formes : naturelle de couleur noire et ...

<http://www.jean-lefebvre.com/actu/infotech/infotech3.htm>

La CHAÎNE des TERRILS

Véritable patrimoine historique de la région, ils ont été érigés petit à petit au cours des deux derniers siècles d'industrie minière et se transforment aujourd'hui en support ...

http://www.nordmag.com/nord_pas_de_calais/lens/la_chaine_des_terrils.htm

La saga du charbon : matière énergétique

... de racines, sur laquelle il repose, et une couche de grès ou de **schistes** ... On distingue deux grands types de bassins **houillers** : les bassins paraliques et les ...

http://www.groupecharbonnages.fr/version_francaise/Saga/Matiere_energetique/ody-origine.html

Mines

... arrêtés avant 1900 - 329 terrils dont 205 encore propriété des ex-HBNPDC, représentant environ 515 millions de tonnes de **schistes houillers** et de cendres. ...

<http://www.nord-pas-de-calais.drivre.gouv.fr/ssol/mines.html>

Mouvement pour la Protection et la Promotion de l'Environnement (...

... Dans le Borinage, les **terrils** sont formés de roches de la ... types de roches rencontrés sont : les roches friables formées par les **schistes houillers** ...

<http://www.mppe.be/r-terrils.html>

Schéma des carrières du Gard

... A noter que l'exploitation du terril de **schistes houillers** de Champclauson à la Grand'Combe a été incluse dans cette catégorie. ...

<http://www.drivre-lr.org/publications/schemc30/adequ.htm>

site

Les **terrils** ont grandi près des puits, ou plus exactement près des lavoirs, suivant l'importance prise par ceux-ci au fil des années. Et c'est ainsi que des " montagnes " ont surgi dans cette...

<http://www.lille.archi.fr/eal/pages.eal/...QUE/page63.html>

Sol - Données Ecologiques, Techniques, Administratives, Socio- ...

... maîtrises d'oeuvre, les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères rentrent dans la composition d'une grave routière, les **schistes houillers** ;; le ...

http://www.planetecologie.org/ENCYCLOPEDIE/CollectivitesLocales/0_cl-sol/0_7DonEco-technSol.html

Sol - Données Ecologiques, Techniques, Administratives, Socio- ...

... aux fonds de décharges industrielle ou ménagère, aux sommets de **terrils** de ... rentrent dans la composition d'une grave routière, les **schistes houillers** ;; le ...

http://www.planetecologie.org/ENCYCLOPEDIE/CollectivitesLocales/0_cl-sol/0_7DonEco-technSol.html

Ste Cécile d'Andorge - Pays alésien

... le bassin minier de La Grand'Combe dont les terrains **houillers** occupent tout le sud de la commune jusqu'au vallat de la Place de Portes. Au nord, les **schistes** ...

<http://www.cevennes-ceze.org/zoned/cecile/decouv/c3pres.htm>

STTP carrière de **schistes** rouges

sarl STTP (Alès-Gard)carrière de **schistes** rouges. Un produit naturel recyclé haute performance, pour l'aménagement d'espaces verts, de terrains de sport stabilisés.

<http://www.sttp.fr/accueil.htm>

terril_generalites

... Ces fossiles se trouvaient dans les **schistes** et grès qui limitaient les veines de ... ORIGINE DES FOSSILES **HOUILLERS**. Il ya environ 310 millions d'années, au ...
<http://membres.lycos.fr/fossilomania/articles/terril/terrilgen.htm>

[terril_generalites](#)

... Ces fossiles se trouvaient dans les **schistes** et grès qui limitaient les veines de ... ORIGINE DES FOSSILES **HOUILLERS**. Il ya environ 310 millions d'années, au ...
<http://membres.lycos.fr/fossilomania/articles/terril/terrilgen.htm>

[Carrieres](#)

En juin 1994, le basculement des exploitations de carrières et de terrils de la législation Code Minier à la législation Installations Classées pour la Protection de l'Environnement
<http://www.nord-pas-de-calais.drire.gouv.fr/ssol/carriere.html>

Terrils de la fosse 11/19 - Loos-en-Gohelle (Environs de Lens)

Au cœur du plat pays deux immenses **terrils** coniques, recouverts d'une étonnante végétation, culminent à 180m permettant la découverte des paysages alentours.

<http://www.tourisme.voila.fr/villes/lens...lterril/acc.htm>

Terrils page 1

... combustions. Les **schistes houillers**, ainsi que les débris de charbon proprement dit représentent la fraction combustible des **terrils**. Ils ...

http://www.cgh.yucom.be/miner_terrils/terrils_1.htm

Terrils page 1

... Les plus fréquemment rencontrées sont des grès PSAMMITE, des **schistes houillers**, des nodules de PYRITE et des concrétions pélitiques du type Septaria. ...

http://www.cgh.yucom.be/miner_terrils/terrils_1.htm

Veilles et conseils

La Chaîne des Terrils, l'Association des Naturalistes de la Gohelle et Nature et Vie sont les premières structures à avoir contribué à la reconnaissance et la préservation du site

<http://chaine.des.terrils.free.fr/etudesconseils.htm>

UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

L'exploitation du charbon dans le bassin minier Nord-Pas-de-Calais a engendré le dépôt sous forme de terrils d'importantes quantités de résidus. Le lessivage par les eaux ...

http://www.univ-lille1.fr/geosciences/page_ufr/actualites/these_denimal.html

Bureau des Ressources Géologiques et Minières

Site répertoriant les connaissances sur le Drainage Minier Acide

<http://www.brgm.fr/DMA/Default.htm>

Page : 1

[\[NCI1\] Glossaire](#)

Page : 1

[\[NCI2\] Glossaire](#)

Page : 7

[\[NCI3\] 0/ ?](#)

Page : 7

[\[NCI4\] Glossaire](#)

Page : 10

[\[NCI5\]](#)

Page : 10

[\[NCI6\]](#)

Page : 10

[\[NCI7\]](#)

Page : 10

[\[NCI8\]](#)

Page : 10

[\[NCI9\]](#)

Page : 12

[\[NCI10\] Glossaire](#)

Page : 12

[\[NCI11\] Cette absence ne permet pas ! Il faudrait faire à ce sujet une étude écotoxicologique.](#)

Page : 12

[\[NCI12\] ?](#)

Page : 13

[\[NCI13\] Pas très heureux ! Pour assurer un cohérence à la masse](#)

Page : 13

[\[NCI14\] ? Glossaire !](#)

Page : 15

[\[NCI15\] Glossaire](#)

Page : 17

[\[NCI16\] Revoir la bibliographie en fonction de normes communes pour tout les dossiers.](#)

Annexe 15

Les boues de curage

Avertissement

Le premier problème que je vois dans ce texte c'est que le Valori'sable® est cité 20 fois pour 16 pages de texte! N'est-ce point trop?

Tableau 4, une référence bibliographique non consignée dans la bibliographie générale.

La numérotation des tableaux doit être faite en chiffre arabe comme pour les autres dossiers.

Les boues de curage

Résumé

Le terme boues de curage regroupe plusieurs matériaux d'origines variées, qui résultent de la sédimentation de particules d'origine naturelle et anthropique et peuvent être assimilés à des sédiments plus ou moins pollués. On distingue 4 catégories principales de boues de curage : les boues de bassins de retenue d'eaux pluviales (en milieu routier ou urbain), les boues de fossés, les boues de canaux, cours d'eau, retenues ([barrages hydroélectriques et irrigation](#)) et les boues de réseaux d'assainissement. Quelle que soit leur origine, les boues ne peuvent pas être utilisées à l'état brut, elles doivent subir un traitement préalable visant principalement à isoler la fraction sableuse susceptible d'être valorisée et à éliminer la fraction fine souvent chargée en polluants. Le lavage est le procédé le plus classiquement utilisé, les installations de traitement sont généralement implantées sur le site d'une station d'épuration. Ce traitement semble adapté aux boues de réseau, en revanche il n'est pas adapté aux boues de bassins de rétention, compte tenu de leur très fort pourcentage en particules fines et de leur teneur en eau > 50 %. Le criblage à sec, qui permet également de séparer la fraction sableuse, est une autre technique de traitement.

On constate une grande variabilité des concentrations en métaux lourds et hydrocarbures dans les boues qui sont parfois très contaminées. Les métaux lourds les plus courants sont le plomb, le zinc, le cuivre et le cadmium dans les boues de bassins, les fossés et les réseaux d'assainissement, il faut y ajouter le nickel et le chrome dans les boues de cours d'eau.

Les rares caractérisations géotechniques réalisées sur du sable traité (F11, D_{L1}) indiquent que ce matériau peut être utilisé en remblayage de tranchées et en techniques routières. De plus, il semblerait que son utilisation entraîne des flux de polluants relargués, très faibles.

Les quantités de boues curées annuellement sont importantes : environ 9 millions de tonnes pour les boues de bassins et fossés, 8 millions pour les boues de cours d'eau et canaux, 500 000 t pour les réseaux d'assainissement. Les informations relatives aux gisements de boues traitées sont rares tant en France qu'à l'étranger. En extrapolant les chiffres connus, à l'ensemble du territoire français on estime que le gisement de sable issu des boues de curage de réseaux est de 200 000 t, soit 2 % de la production annuelle de sable.

Compte tenu des contraintes législatives de plus en plus fortes dans le domaine de l'environnement, des recherches sont en cours pour caractériser ces matériaux en vue de leur traitement et de leur valorisation éventuelle.

Définition

Le terme « boues de curage » désigne un ensemble de matériaux d'origines variées, qui résulte de la sédimentation de particules d'origine naturelle et anthropique et peuvent être assimilés à des *sédiments* plus ou moins pollués. Ces particules sont véhiculées par les

eaux de ruissellement engendrées par les précipitations. On peut distinguer quatre catégories principales de boues de curage :

- ~~Les-les~~ boues de curage de bassins de retenue d'eaux pluviales (en milieu routier ou urbain) ;
- ~~Les-les~~ boues de curage de fossés ;
- ~~Les-les~~ boues de curage de canaux, cours d'eau, retenues ;
- ~~Les-les~~ boues de curage de réseaux d'assainissement.

Ces différentes catégories ont été sélectionnées car elles sont susceptibles, après traitement, d'être réutilisées en technique routière.

Textes spécifiques de référence

Décret n° 2002-540 du 18 avril 2002 relatif à la classification des déchets : rubriques 17 05 03 à 17 05 06.

Circulaire n° 2001-39 du 18 juin 2001 relative à la gestion des déchets du réseau routier national.

Circulaire conjointe du MATE et du METL du 15 février 2000 sur la planification des déchets du bâtiment et des travaux publics

Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées.

Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau

Loi n° 92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets

Arrêté du 9 septembre 1997 modifié relatif aux installations de stockage des déchets ménagers et assimilés.

Circulaire de 14 janvier 1977 relative à l'autorisation des déversements, écoulements, jets, dépôts et autres faits susceptibles d'altérer la qualité des eaux superficielles, souterraines et de la mer dans les limites territoriales.

Origine, élaboration et formation

Sommaire :

1. Boues de bassins de retenue d'eaux pluviales.
2. Boues de curage de fossés
3. Boues de curage de canaux, cours d'eau, retenues
4. Boues de curage de réseaux d'assainissement
5. Traitement

Comme cela a été dit précédemment, les différentes catégories de boues identifiées résultent toutes de la sédimentation de particules d'origine naturelle et anthropique, transportées par les eaux de ruissellement, les eaux usées ou les cours d'eau.

Plus de détails : catégories de boues identifiées

1. Boues de bassins de retenue d'eaux pluviales

Les figures 1 à 3 présentent des bassins de retenue des eaux pluviales.



Figure 1 : Bassin de retenue des eaux pluviales de St Joseph de Porterie (Nantes)



Figure 2 : Bassin d'infiltration des eaux pluviales de Ronchin (Lille)

Les bassins de rétention recueillent les particules de sol des bassins versants et les apports liés au trafic routier :



Figure 3 : Bassin de retenue des eaux pluviales de Cheviré (Nantes)

*les particules arrachées à la chaussée par les pneus (bitume, ciment, granulats), qui génèrent essentiellement des éléments majeurs (Si, Ca, Al, Fe) peu solubles et ne présentent pas de caractère polluant. Les glissières de sécurité sont source de zinc et de cadmium. L'usure des pneumatiques libère des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), ainsi que du zinc, du calcium, du soufre et pour les plus récents de la silice. Les garnitures de frein [\[2\]](#) génèrent du zinc et du cadmium. La corrosion des carrosseries et des moteurs libère les métaux présents dans les aciers et alliages : nickel, cuivre et chrome. Cette corrosion est accentuée par les sels de déneigement. Enfin, l'arrachement de particules de pots catalytiques disperse des éléments comme le platine et le palladium.

*la combustion des essences qui produit des gaz et fumées (des particules de très petites tailles sont émises en particulier par les moteurs diesels) contenant différentes formes de carbone (CO, CO₂ et hydrocarbures). Depuis 1996, les émissions en plomb ont fortement diminuées, mais n'ont disparu complètement que très récemment.

Ces bassins de rétention recueillent également les apports atmosphériques des activités industrielles avoisinantes qui s'accumulent sur les surfaces imperméabilisées. Il en résulte des boues aux caractéristiques très variées aussi bien en terme de teneur en eau, distribution granulométrique, composition minéralogique, teneur en matière organique et en polluants.

2. Boues de curage de fossés

Leur origine est la même que celle des boues de bassins de retenue, les particules se déposent dans les fossés au lieu d'être recueillies dans les bassins. Les fossés sont souvent enherbés ce qui favorise la rétention des particules en suspension sur lesquelles est fixée

l'essentiel de la pollution. De ce fait, ce type de fossé est de plus en plus utilisé comme technique alternative en assainissement pluvial.

3. Boues de curage de canaux, cours d'eau, retenues

La formation des boues (vases) de canaux, cours d'eau ou retenues (barrages hydroélectriques, plans d'eau) est liée à la sédimentation de particules provenant de l'érosion des sols et des roches. Plusieurs facteurs interviennent sur la décantation des particules et sont propices à l'envasement, particulièrement dans les canaux. Ainsi, la sédimentation est favorisée par une topographie plane, les faibles débits, les rejets industriels urbains, l'érosion. La présence d'éléments toxiques (métaux, pesticides, hydrocarbures) aggrave la situation principalement dans les zones urbanisées et industrielles. Le curage (figure 4) est souvent nécessaire pour prévenir les risques d'inondation, rétablir le tirant d'eau pour la navigation et restaurer le milieu naturel.



Figure 4 : exemple de curage

4. Boues de curage de réseaux d'assainissement

Les eaux résiduaires urbaines et pluviales transportent des matières en suspension qui décantent dans les réseaux d'assainissement. Ces boues (ou sables) sont constituées d'un amalgame de matières organiques et de sable en proportions très variables selon le type de réseau et la nature de l'ouvrage (collecteur, chambre à sable). origine des polluants rencontrés dans les boues^[3]

Les boues (sables) extraits des réseaux d'assainissement constituent une charge importante pour les exploitants. Leur nature particulièrement variable et hétérogène en font un produit pour lequel il est de plus en plus difficile de trouver une destination finale satisfaisante (AGHTM, 1994, 1996).

Plus de détails : origine des polluants rencontrés dans les boues

5. Traitement

Les traitements proposés visent principalement à isoler la fraction sableuse susceptible d'être valorisée ; les rares exemples concernent des boues de curage de réseau mais ce traitement peut s'appliquer aux différentes catégories de boues répertoriées ici.

-Lavage des sables

Le lavage à l'eau des sables d'assainissement est un procédé qui se pratique dans plusieurs villes françaises. La filière type de lavage des sables comporte 4 étapes : criblage, lavage, classification, essorage. Les installations de traitement de solides sont généralement implantées sur le site d'une station d'épuration afin d'utiliser l'eau traitée en sortie de clarificateur pour les différentes opérations de lavage, et de rejeter les eaux de lavage des solides en tête de station. Des essais ont été réalisés au LRPC de Bordeaux avec le pilote ACTISEP B12 simulant une unité de lavage réelle, quatre types de produits étaient récupérés en sortie (fig. 5):

- encombrants ;
- petit fumier ;
- eaux de lavage avec particules fines ($< 200 \mu\text{m}$) ;
- sables lavés.

De la même manière, la société ECOPUR a développé une filière de production de granulats à partir de boues de curage, pour permettre une valorisation du sable contenu dans ces boues. Soixante mille tonnes de boues sont traitées chaque année ce qui permet d'obtenir environ 15 000 tonnes de sable désigné sous le nom de ~~valori'sable~~ Valori'sable®.

-Criblage à sec

Des essais sur crible rotatif ont été menés à Bordeaux avec le concours de la Communauté Urbaine (Sermanson, 1998). L'objectif de cette filière est de séparer la partie minérale sableuse de la partie non minérale.

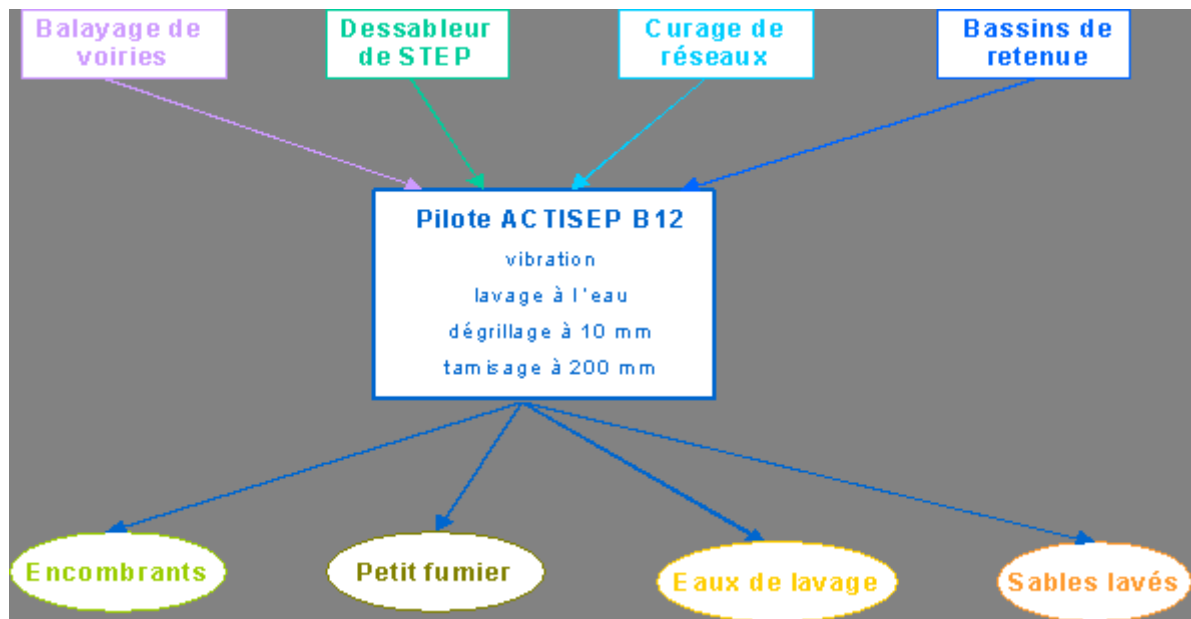


Fig. 3. Origine des sous-produits lavés et sorties obtenues avec le pilote ACTISEP B12 (d'après Sermanson, 1998).

Il convient de noter que du fait de leur très fort pourcentage en particules fines et de leur teneur en eau supérieure à 50 %, le lavage à l'eau n'est pas adapté au traitement des boues de bassins de retenue (risque de colmatage des tamis).

Caractéristiques physico-chimiques

Sommaire :

1. Produit brut

2. Produit élaboré

Les boues sont constituées d'une fraction solide (30 à 70 % selon qu'il s'agit de boues prélevées en milieu aqueux ou sec) comprenant des matières sableuses, des composés organiques dégradables et des substances issues de l'utilisation de la route, et d'eau (70 à 30 %).

1. Produit brut

1.1 Caractéristiques chimiques globales

Il existe peu de données concernant la caractérisation chimique globale des boues de curage, toutes catégories confondues. D'une manière générale, les auteurs ne font mention que des paramètres recherchés spécifiquement pour la pollution, notamment les *métaux lourds*. Les quelques valeurs trouvées dans la littérature internationale sont reportées dans le tableau I. Les paramètres le plus souvent analysés sont Mn, Fe, Al. On trouve une valeur relative au phosphore total, 2 valeurs concernant l'azote et une relative à la masse volumique.

L'examen de ces données montre qu'en règle générale, la teneur en eau des sédiments est très importante, souvent supérieure à 50 %. Le taux moyen de matières volatiles, et donc la teneur en matière organique, est relativement faible comparé aux boues de stations d'épuration (8 % /50-60 %), mais on rencontre des teneurs dépassant 30 %, notamment dans les boues de curage de canaux.

Chebbo (1992) note que les solides en réseaux visitables sont beaucoup plus organiques que les solides transférés en suspension par temps de pluie ou temps sec. Les dépôts formés dans les canalisations sont très hétérogènes. Les particules qui les constituent sont plus organiques et plus fines que dans les collecteurs. Une étude granulométrique des dépôts du réseau d'assainissement du Marais (Paris) a été réalisée par Gromaire (1998) ; conformément à ce qui a été observé dans d'autres réseaux, ces dépôts sont grossiers dans les collecteurs (D_{50} voisin de 1 mm).

Les teneurs en phosphore sont suffisamment élevées pour engendrer des risques d'eutrophisation par lessivage. Des bassins/pièces d'eau situés à proximité de remblais routiers constitués avec ces matériaux pourraient devenir *eutrophes*. Le pH est généralement neutre, voire légèrement basique, ce qui limite les risques de relargage des métaux.

	Concentration/valeur (référence)	Concentration/valeur (référence)
Teneur en eau (%)	45 (ASFA, 1993) ^b	
Matières volatiles (%)	8,2 (ASFA, 1993) ^b	6-68 (AGHTM, 1994) ^{ré}
D_{50} (μm)	870 (Gromaire, 1998)	
pH	7,6 (ASFA, 1993) ^b	
Al (g kg^{-1})	53-69 (Legret et al., 1995) ^b	7-14 (AGHTM, 1994) ^{ré}
Fe (g kg^{-1})	20 (Lee et al., 1997) ^b	9,5-25,9 (AGHTM, 1994) ^{ré}
Mn (mg kg^{-1})	195 (Lee et al., 1997) ^b	100-200 (Revitt et Elis, 1979) ^{ba}
PT (g kg^{-1})	0.1-1.6 (Yousef et al., 1994) ^b	

Tab. I. Composition de différentes boues de curage. b: bassin, ré: réseau

· Teneurs en métaux lourds et hydrocarbures

On trouve dans la littérature un certain nombre de données relatives aux teneurs en métaux lourds dans les boues de curage. Le tableau II présente les valeurs tirées de la littérature, pour des boues de bassins de décantation routiers et urbains et des vases de canaux. Il n'existe pas de norme spécifique pour ces matériaux, on compare habituellement les valeurs à la norme hollandaise pour les sols pollués ou aux teneurs limites dans les sols fixées en France pour les épandages de boues sur les sols agricoles (arrêté du 8 janvier 1998).

Référence	Cd mg kg^{-1}	Cr mg kg^{-1}	Cu mg kg^{-1}	Ni mg kg^{-1}	Pb mg kg^{-1}	Zn mg kg^{-1}	HCT mg kg^{-1}
Lee et al. (1997)	4	-	-	-	55	130	-
Legret et al. (1995)	1-4	39-80	84-208	20-30	300-819	683-1980	-
Yousef et al. (1990)	2-28	19-68	4-73	7-29	30-1025	22-538	-
Jacopin et al. (1998)	0,2-1,8	-	15-118	-	47-250	45-630	-
ASFA (1993)	0,5-3,9	4-318	2-372	5-156	13-1417	27-4900	1-15087
Nightingale (1987)	-	-	24-39	22-40	130-1400	-	-

Marot (1998)	1	30	15	-	40	100	-
Norme hollandaise ¹	0,8	100	36	35	85	140	-
Norme hollandaise ²	12	380	190	210	530	720	-
Norme française	2	150	100	50	100	300	-[5]

Tab. II. Teneurs en métaux lourds dans des boues de bassins de décantation routiers et urbains - Comparaison avec les normes françaises et hollandaises pour les sols pollués.

1 : valeur cible, 2 : valeur d'intervention, HCT : hydrocarbures totaux

On constate une très grande variabilité des concentrations en métaux lourds et hydrocarbures totaux, certains sédiments étant peu contaminés alors que d'autres ont des teneurs très élevées. Plusieurs facteurs, liés au contexte, peuvent expliquer cette variabilité en particulier :

- la densité du trafic ;
- la configuration du bassin versant alimentant le bassin, notamment sa nature géologique ;
- le climat ;
- la conception du bassin.

D'une manière générale, les concentrations en Ni et Cr ne dépassent pas les valeurs cibles de la norme hollandaise pour les sols pollués; ces deux métaux ne sont pas typiques de la pollution routière et il est donc logique que leur concentration dans les boues de bassins de retenue d'eaux pluviales en milieu routier soit relativement faible. Les teneurs en Cd sont supérieures à la teneur limite dans les sols fixée en France pour les épandages de boues sur les sols agricoles, et à la valeur cible de la norme hollandaise pour les sols pollués. Les concentrations en Pb et Zn sont très élevées et dépassent fréquemment la norme d'intervention hollandaise.

Une étude relative aux boues de curage de fossés a été réalisée par les LRPC de St Briec et Aix- en -Provence (Sadowy et Lerestif, 1998) et porte sur la caractérisation de sédiments prélevés dans des fossés à 3 m environ de la chaussée, sur une profondeur de 10 cm. Il s'agit dans un cas d'un trafic moyen (5 à 20 000 veh/j), dans l'autre cas d'un trafic faible (< 5 000 veh/j). Les tableaux IIIa et IIIb montrent que dans l'ensemble, les sédiments sont beaucoup moins contaminés que ceux issus du curage de bassins.

[Plus de détails : Les tableaux IIIa et IIIb](#)

Le tableau IV présente les concentrations en métaux lourds et hydrocarbures totaux rencontrées dans les boues de curage de réseaux. La comparaison de ces valeurs avec les concentrations en métaux lourds mesurées dans les boues de bassins de retenue (tab. II) montre que dans les deux cas les teneurs sont comparables et élevées. Les concentrations en Cu sont plus fortes dans les boues de curage de réseau. La teneur en Zn atteint 4040 mg kg⁻¹ dans les dépôts du Marais à Paris (toitures en zinc). Les teneurs en hydrocarbures totaux sont très variables mais du même ordre de grandeur que celles rencontrées dans les boues de bassins.

[Plus de détails : Les tableaux IV](#)

· Caractéristiques minéralogiques

Les analyses minéralogiques conduites sur les boues de curage sont pratiquement inexistantes. Les seules informations trouvées dans la littérature concernent la caractérisation minéralogique de boues de dragage (Marot, 1998) et les boues de bassins de décantation (Lee, 1996).

L'identification minéralogique est effectuée par diffractométrie des rayons X. Une simple observation à la loupe binoculaire permet néanmoins d'identifier rapidement les principaux minéraux qui constituent ~~la matrice~~ **les composants inorganiques** de la boue, tels que le quartz, les feldspaths, les carbonates. Une caractérisation spécifique sur lame orientée permet de déterminer les argiles, les principales étant la kaolinite, l'illite et les smectites. La

fraction organique se présente sous des formes très variées : débris végétaux, micro-organismes, colloïdes etc. L'étude de Lee (1996) montre logiquement que la composition minéralogique varie en fonction de la nature des bassins versants. Les minéraux les plus fréquemment rencontrés dans les sédiments de bassins sont le quartz, la kaolinite, la montmorillonite, l'illite, les feldspaths et la calcite. L'abondance relative des minéraux varie d'un bassin à l'autre. Si on ne peut déduire le comportement mécanique ou hydraulique d'une simple observation minéralogique, la connaissance de l'abondance et de la nature des minéraux argileux permet une première approche de leurs caractéristiques principales. Entre autres, la présence d'argiles gonflantes (montmorillonites) peut entraîner des modifications du matériau et doit être prise en compte en cas de réutilisation en technique routière.

2. Produit élaboré

· Après traitement

Les paragraphes précédents ont montré que les boues de curage, fréquemment contaminées par les métaux lourds et les hydrocarbures, avec des teneurs en eau et matières organiques élevées, ne sont pas compatibles avec une utilisation directe en technique routière.

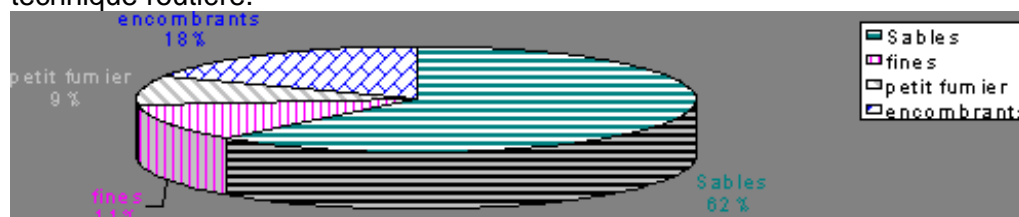


Fig. 6. Composition relative des sous-produits de l'assainissement

La figure 6 montre la répartition des sous-produits d'assainissement à l'issue du lavage sur pilote. Il apparaît que ces sous-produits sont composés à 70 % environ de matière minérale et contiennent 30 % de matière organique.

* *Criblage à sec*

Après criblage sur crible rotatif (Sermanson, 1998), les résultats témoignent d'un abattement important de la matière organique : de 26 % au départ à 7 % pour le produit criblé. Les résidus du criblage à sec sont représentés par les matériaux minéraux (encombrants) et la partie minérale. Les teneurs en micropolluants du produit criblé restent identiques à celles du produit de départ ; la partie sableuse ne peut donc pas être utilisée en remblai technique routier.

Parmi les autres techniques de traitement on peut citer :

- la séparation solide-liquide-, **Différentes différentes** techniques de réduction de la teneur en eau existent : lits de séchage, filtration, ajouts de floculants ou coagulants ;
- le traitement des boues visant à immobiliser les polluants par encapsulation et/ou piégeage chimique;
- le traitement des boues visant à extraire les polluants par des techniques de tri : séparation granulométrique en voie sèche ou humide, séparation gravimétrique ;
- un séchage suivi d'une incinération ;
- des traitements complexes couplant séchage, incinération et stabilisation chimique (le procédé Novosol ® de Solvay).

- Caractéristiques globales

Les seules données disponibles concernent le **valori'sableValori'sable®** produit par la société ECOPUR à Tremblay en France, et plus précisément un **valori'sableValori'sable®** ayant subi une maturation pendant 6 mois (Domas *et al.*, 2000). Le sable mûri a une teneur en matière organique de l'ordre de 5 %, une teneur en ions sulfates de 3_300 mg kg⁻¹ et une granulométrie uniforme entre 0,2 et 5 mm. Ce matériau est dépourvu de particules argileuses, les principaux minéraux constitutifs sont le quartz (70 %), la calcite (15 %) et les feldspaths.

· Teneurs en métaux lourds et hydrocarbures

Les teneurs en métaux lourds et HAP sont reportées dans le tableau V. Les concentrations en métaux lourds, si elles sont inférieures à la valeur d'intervention de la norme hollandaise pour le diagnostic des sols pollués, sont supérieures à la valeur cible de cette même norme,

et donc relativement élevées. En conséquence, il convient d'étudier le comportement environnemental de ces sables lorsqu'ils sont mis en place dans le milieu naturel.

Cd mg kg ⁻¹	Cr mg kg ⁻¹	Cu mg kg ⁻¹	Ni mg kg ⁻¹	Pb mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹	As mg kg ⁻¹	Hg mg kg ⁻¹	HAP mg kg ⁻¹
1,5	218	370	22	125	660	<1	1,2	7,1-9
0,8	100	36	35	85	140	29	0,3	1
12	380	190	210	530	720	55	10	40

Tab. V. Concentration en métaux lourds et hydrocarbures d'un valori'sable Valori'sable® maturé (d'après Domas et al., 2000)

Caractéristiques géotechniques

Sommaire :

1. Caractéristiques géotechniques du valori'sable Valori'sable

2. Etude du comportement mécanique de vases

Deux études ont été identifiées dans la littérature concernant le comportement mécanique de boues traitées. L'une est relative à la fraction sableuse d'une boue issue du curage de réseaux d'assainissement ([Domas et al., 1999](#)), l'autre a trait à des vases de canaux (Marot, 1998).

1. Caractéristiques géotechniques du valori'sable Valori'sable®

Le valori'sable Valori'sable®, dont les principales caractéristiques géotechniques sont reportées dans le tableau VI, a été utilisé pour un chantier de remblayage de canalisation.

[Plus de détails : le tableau VI](#)

Les caractéristiques géotechniques du valori'sable Valori'sable® permettent de le classer dans la catégorie F11 des sables faiblement organiques (3-10%) de la classification NF P11-300 des matériaux utilisables en infrastructure routière ; il est assimilable géotechniquement à un matériau D1, c'est à dire à un sable alluvionnaire propre. La forte proportion de la fraction minérale granulaire (quartz + feldspaths + calcite) et la faible teneur en particules argileuses permettent une excellente tenue au compactage. Le valori'sable Valori'sable® semblerait donc pouvoir être utilisé en remblayage de tranchées et d'une manière plus générale en techniques routières et dans d'autres domaine du BTP (Domas et al., 1999).

2. Etude du comportement mécanique de vases

Le comportement mécanique de boues traitées issues du curage de canaux a été étudié par Marot (1998). Il est en effet important de connaître leur comportement mécanique pour une meilleure gestion des matériaux dans l'hypothèse d'une réutilisation.

L'étude de la consolidation sous poids propre de matériaux provenant du traitement de boues de curage se heurte à une difficulté majeure : en raison du pourcentage élevé de fines particules et de la forte teneur en eau ces produits ont des temps de consolidation très longs. On a donc recours à des modèles réduits auxquels on applique de fortes gravités pendant quelques heures, en faisant des essais en centrifugeuse. Le suivi du tassement est mesuré au fur et à mesure de la consolidation, et des lois de similitude permettent de transposer les résultats du modèle réduit à des résultats sur site. Trois types de matériaux ont été étudiés : un sédiment tamisé à 5 mm et les fractions fine et grenue de ce même sédiment. Les résultats mettent en évidence la complexité de ces matériaux, la consolidation des échantillons brut et fin est très lente, même en condition drainée. Les valeurs de résistance mécanique mesurées dans les éprouvettes après essais sont faibles.

[Plus de détails : Trois types de matériaux](#)

Caractéristiques environnementales

Sommaire :

1. Transferts vers les sols

2. Transferts dans les eaux

Les processus de mobilisation et de fixation des polluants dans les sédiments sont régis par les caractéristiques physico-chimiques de l'environnement, par les propriétés du sédiments et par l'activité microbiologique. Toute modification de ces paramètres est susceptible de provoquer une rupture d'équilibre et d'engendrer un relargage des polluants.

1. Transferts vers les sols

Quelques études ont été réalisées concernant la migration des polluants (principalement les métaux lourds) d'origine routière dans les sols en bordure de route ou dans les bassins de retenue des eaux pluviales. En règle générale, ces travaux montrent que la migration excède rarement 10 à 20 cm de profondeur et que la décroissance des teneurs est très rapide. Le cadmium et le zinc semblent être les métaux les plus mobiles (Legret *et al.*, 1995). Le tableau VII présente les résultats d'analyses de métaux effectuées dans un sol sous un bassin de décantation recevant des eaux pluviales.

[Plus de détails : Le tableau VII](#)

Des constatations analogues concernant la migration relativement faible des métaux dans les sols ont été faites par Ruban *et al.* (1998) suite à des épandages de boues de curage de canaux sur des sols agricoles.

[Plus de détails : Ruban *et al.* \(1998\)](#)

2. Transferts dans les eaux

Des études ont été menées sur des sédiments de bassins de retenue autoroutiers, afin de mettre en évidence la mobilité éventuelle des métaux.

[Plus de détails : mobilité éventuelle des métaux](#)

D'autres travaux concernent le **valori'sableValori'sable®** ; des tests de lixiviation selon la norme X 31 210 ont été réalisés. De même, des essais en cases lysimétriques de 1 m³, contenant du **valori'sableValori'sable®** compacté à l'aide d'un marteau vibrant pilonneur ont été effectués. La simulation des pluies était faite par arrosage régulier à l'aide d'eau déminéralisée, les eaux de percolation étaient récupérées et analysées. Les valeurs obtenues au cours des différents essais sont comparables (Domas *et al.*, 2000).

Les concentrations en hydrocarbures totaux sont de l'ordre de 1 mg L⁻¹, les HAP ont des teneurs inférieures à 0,07 µg L⁻¹; ces valeurs sont inférieures aux valeurs limites fixées par les agences de l'eau pour des eaux de rivière de bonne qualité (SEQ Eau). Les teneurs en sulfates et métaux lourds ne posent pas non plus de problème, à l'exception de Pb et Hg qui montrent quelques valeurs élevées.

L'examen des concentrations dans les eaux de percolation n'apporte pas une réponse complète concernant l'impact environnemental qu'aurait la mise en place d'un matériau tel que le **valori'sableValori'sable®** dans le milieu naturel. Pour ce faire, il convient d'étudier les quantités relarguées dans le milieu par unité de surface et de temps (flux). Les résultats montrent que dans des conditions normales d'utilisation, correspondant à un écoulement discontinu, l'utilisation de **valori'sableValori'sable®** entraîne des flux de polluants relargués très faibles.

Aspects sanitaires

Pour ces matériaux, les risques de transfert vers l'air apparaissent négligeables. Il y a en revanche, des transferts possibles vers les sols et vers l'eau.

Les risques environnementaux et sanitaires imputables aux boues de curage concernent les transferts de polluants contenus dans les boues de curage vers la flore, la faune et éventuellement vers l'homme. Peu d'études ont été réalisées sur le sujet, davantage de travaux concernent les risques liés à l'épandage de boues d'épuration.

Une étude récente relative à la toxicité des boues de bassins décanteur-deshuileurs en vue de leur épandage sur les emprises routières a été réalisée au CETE de l'Est (Gigleux, 2000). Les résultats préliminaires ont montré que l'épandage de sédiments autoroutiers sur un talus présentait certains risques pour l'environnement et ne devait pas être réalisé sans

précautions. La fraction mobilisable des polluants organiques et métalliques présents dans les sédiments est faible (moins de 5 % du ~~pool~~ total (?) initial) ; la migration des polluants vers les zones limitrophes et les exutoires (nappes, cours d'eau) semble donc limitée. Les polluants présents dans la matrice initiale restent majoritairement fixés dans celle-ci ou dans l'horizon superficiel de la terre végétale. Cependant, des essais de percolation ont montré que les eaux qui s'infiltrèrent au travers des boues présentent des concentrations en métaux sont relativement élevées dans les premières eaux. Les tests toxicologiques réalisés sur les percolats n'ont pas mis en évidence de toxicité aiguë de ces eaux.

Les essais sur plantes ont montré que les boues brutes sont toxiques pour certaines espèces. La combinaison des analyses chimiques et des essais toxicologiques constitue un moyen d'étude fiable pour l'évaluation du danger que représentent les boues.

Enfin, les résultats ont permis de définir quelques mesures simples à appliquer qui permettraient aux équipes d'entretien de limiter les risques pour l'environnement si des épandages de boue étaient réalisés. Il s'agirait de prévoir :

- des aires d'égouttage avec récupération des premières eaux ;
- l'épandage de ces boues sur des zones non vulnérables prédéterminées et dans des secteurs à faible pente ;
- le mélange des boues avec de la terre végétale et le régilage sur environ 20 cm d'épaisseur ;
- l'ensemencement immédiat de ces dépôts avec un mélange de graminées.

Par ailleurs, une ébauche d'évaluation de la toxicité des sables lavés susceptibles d'être utilisés en technique routière a été faite (Lissalde, 2002). L'étude est incomplète (elle ne porte que sur le cadmium) mais elle montre qu'il est prudent de ne pas utiliser les sables lavés dans les zones vulnérables à la pollution (ressource en eau susceptible d'être utilisée pour la production d'eau potable ou l'irrigation).

Utilisation dans les infrastructures

Le choix de la filière de destination des boues repose sur plusieurs critères parmi lesquels : la conformité réglementaire, la meilleure pratique environnementale, la meilleure technique disponible, le coût.

Remblaiement

Cette solution semble être une voie de valorisation intéressante car elle ne nécessite pas de matériaux nobles et pourrait être adaptée aux boues de curage une fois traitées (après élimination de la fraction fine chargée en micropolluants).

Sommaire :

1. Matériau brut

2. Matériaux traités

D'une manière générale, il est très difficile d'avoir des estimations concernant les gisements des différentes catégories de boues répertoriées dans le cadre de l'observatoire. Il est encore plus difficile de trouver des informations relatives aux matériaux traités.

1. Matériau brut

- Boues de bassins de retenue

L'enquête sur les déchets réalisée en 2000 par l'Office National de Routes (ONR, 2001) et menée auprès des directions départementales de l'équipement indique que les volumes curés sont loin d'être négligeables tableau IX. Les chiffres fournis ne représentent qu'une partie des départements mais en faisant une extrapolation grossière à l'ensemble du territoire français (par rapport au nombre de départements) on obtient les volumes annuels suivants : 3 800 000 m³ pour les bassins sur routes nationales, 5 225 000 m³ pour les bassins autoroutiers, soient au total environ 9 000 000 m³. Ces chiffres sont bien sûr approximatifs, les volumes varient beaucoup d'un département à l'autre ; les données récoltées par les DDE sur les autoroutes ne concernaient que les autoroutes non concédées et une extrapolation n'est pas aisée. Ils montrent cependant que le problème des boues de l'assainissement routier est bien réel, crucial même dans certains départements. Ramené en poids de matière sèche, la masse des boues routières (fossés et bassins) est d'environ

5 400-000 tonnes (en prenant pour les boues une densité de 1,2 et une teneur en eau moyenne de 50 %). A titre de comparaison, la production annuelle française de boues de station d'épuration s'élève à un million de tonnes (matière sèche).

[Plus de détails : tableau IX](#)

- Boues de curage de fossés

Toujours d'après l'enquête ONR, le volume extrait des fossés chaque année serait de 317 000 m³, soit une production annuelle de matière sèche de 300 000 tonnes environ

Tableau IX.

- Boues de curage de canaux

Des chiffres de 4 à 11 m³ de boue par mètre linéaire sont cités par Darmendrail *et al.* (1991) pour un cours d'eau du nord de la France. Le tableau X donne des indications de volumes de boues curés pour six pays ou régions (Agence de l'Eau Artois-Picardie AEAP, 2001), ces chiffres englobent cours d'eau et canaux. Pour le moment il n'existe aucune filière pérenne concernant l'élimination des boues de curage des canaux ce qui pose le problème de plus en plus crucial de la navigabilité des voies d'eaux à cause de leur colmatage progressif.

[Plus de détails : Tableau X](#)

- Boues de curage de réseaux d'assainissement

Quelques informations relatives aux tonnages de matériaux curés dans les réseaux d'assainissement sont présentées dans le tableau XI (Sermanson, 1998 ; Delattre *et al.*, 1998). Ces informations concernent les villes du grand Ouest de la France. Des disparités très importantes apparaissent d'une ville à l'autre, qui peuvent s'expliquer par la fréquence des curages, la nature des réseaux, la topographie. Il n'est pas possible d'extrapoler ces chiffres à l'ensemble du territoire français, mais il est manifeste que les tonnages sont ici très inférieurs à ceux des boues de bassins ou de canaux.

		Collecteurs	voiries
District Bayonne-Anglet-Biarritz	Réseau (km)	252	
	Tonnage (t/an)	340	
Nantes	Réseau (km)	620	98 488
	Tonnage (t/an)	4230	18 684
Le Mans	Réseau (km)	136	42 000
	Tonnage (t/an)	86	8280
Rennes	Réseau (km)	617	66 000
	Tonnage (t/an)	1620	1400
St nazaire	Réseau (km)	330	18 000
	Tonnage (t/an)	745	2100
Toulouse	Réseau (km)	1065	9500
	Tonnage (t/an)	745	
Communauté Urbaine Bordeaux	Réseau (km)	2866	18 000
	Tonnage (t/an)	2000	

Tab. XI. Gisements de boues de curage de réseaux et de produits de balayage de chaussées dans l'Ouest de la France (Sermanson, 1998 ; Delattre *et al.*, 1998).

La figure 7 permet de comparer les productions annuelles des différentes catégories de boues.

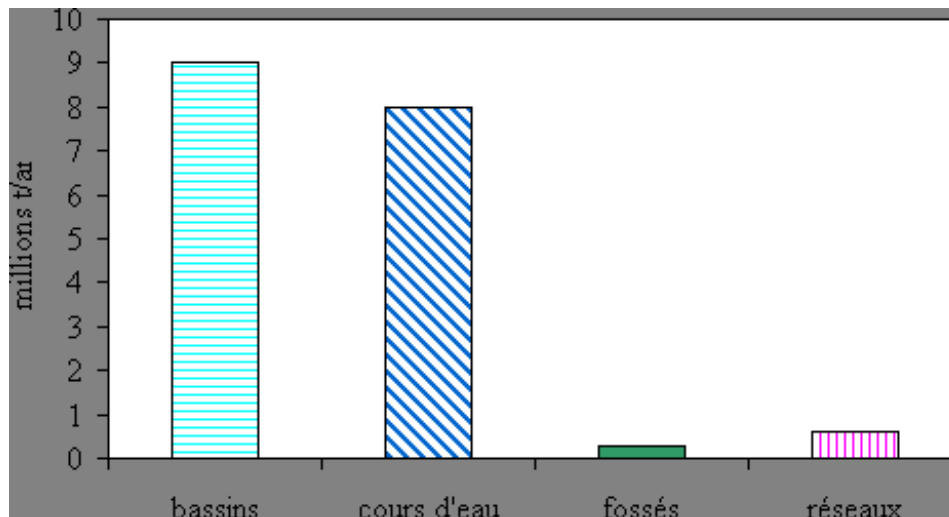


Fig7. Comparaison des volumes de boues curés annuellement en France

2. Matériaux traités

Les informations relatives aux gisements de boues traitées sont très rares ; une synthèse vient d'être réalisée (Lissalde, 2002). Des chantiers expérimentaux de lavage de boues de curage se sont développés dans plusieurs villes françaises mais on ne dispose pas d'information chiffrée relatives aux volumes de matériaux traités.

La seule donnée chiffrée concerne le [valori'sableValori'sable®](#) dont il a déjà été question dans les paragraphes précédents. Le procédé de lavage développé par la société ECOPUR sur le site de Tremblay-en-France permet d'y traiter chaque année 60 000 t de boues et d'obtenir 15 000 t de sable ([valori'sableValori'sable®](#)). En extrapolant ces chiffres à l'ensemble du territoire français, le gisement de sable issu des boues de curage est estimé à 200 000 t, soit 0.2 % de la production annuelle de sable (Domas *et al*, 2000).

Emplois répertoriés

Les études faisant état du réemploi de boues de curage en technique routière sont très peu nombreuses, tant en France qu'à l'étranger. Deux cas ont été répertoriés:

· Valorisation en tranchées de boues de curage de réseaux

Du sable lavé issu du traitement de boues de réseaux d'assainissement (cf 5.1) a fait l'objet d'une étude menée par l'ENPC ([Helaine, 2000](#)), pour une utilisation en technique routière. Deux chantiers pilotes ont été réalisés avec pour objectif de comparer les impacts géotechnique et environnemental du [valori'sableValori'sable®](#) à ceux d'un sable témoin :

remblaiement de tranchées depuis juin 1997 sur la commune de Roissy

utilisation en sous-couche routière pour la réalisation d'une nouvelle voie et de ses réseaux (longueur 300 m, largeur 5 m) depuis janvier 1999 sur la commune de Vitry-sur-Seine.

Le suivi géotechnique a montré que les objectifs de compactage q3 et q4 ([6](#)) pouvaient être atteints avec le [valori'sableValori'sable®](#) dans les conditions de compactage prescrites par le guide LCPC-SETRA. L'emploi du [valori'sableValori'sable®](#) s'est avéré possible en remblais généraux, en remblais de tranchées et en couches de forme non traitées. Le suivi environnemental des eaux de pluie ayant percolé à travers le [valori'sableValori'sable®](#) a également été réalisé. Les concentrations en métaux des eaux de percolation respectent les valeurs seuils applicables aux eaux brutes destinées à la production d'eau potable.

Des essais en lysimètres (sur 1 m³ de [valori'sableValori'sable®](#)) ont permis de simuler une période de 20 ans de précipitation sur le [valori'sableValori'sable®](#) et ont confirmé l'absence de contamination des eaux souterraines.

Recherches en cours

Une opération de recherche menée au LCPC, en collaboration notamment avec le BRGM, le L.S.E.-ENTPE, l'université de Poitiers et la société ISD Environnement concerne les transferts de polluants dans les eaux de ruissellement et les sols. L'un des buts de cette recherche est la caractérisation des boues de l'assainissement pluvial en vue de leur traitement et de leur valorisation éventuelle. [De nombreux travaux de recherche sont développés par Solvay autour de leur procédé Novosol® qui voit dans le résidu après phosphatation et grillage un matériau pouvant couvrir des usages multiples au même titre qu'un sable silteux.](#)

Bibliographie [71](#)

- AEAP (2001). Méthodes de gestion et de réutilisation des sédiments pollués. CD rom Agence de l'Eau Artois-Picardie.
- AGHTM (1994). Devenir des produits extraits des réseaux d'assainissement et des ouvrages de prétraitement. TSM 12, 704-710.
- AGHTM (1996). Devenir des produits extraits des réseaux d'assainissement et des ouvrages de prétraitement. Trois cas concrets. TSM, 5, 345-351.
- Ahyerre M. (1999). Bilans et mécanismes de migration de la pollution organique en réseaux d'assainissement unitaire. Thèse doctorat université Paris 6, 250 p.
- Arrêté du 8 janvier 1998 fixant les prescriptions techniques applicables aux épandages de boues sur les sols agricoles pris en application du décret n° 97-1133 du 8 décembre 1997 relatif à l'épandage des boues issues du traitement des eaux usées.
- Arrêté du 9 septembre 1997 modifié relatif aux installations de stockage des déchets ménagers.
- ASFA (1993). Composition et gestion des boues provenant des ouvrages de dépollution routiers. Etude N° 93-7-2-14, 65 p.
- Balay J., Berdat R. et Harfouche L. (1988). Etude en centrifugeuse de la consolidation sous poids propre de sols très lâches Laboratoire central des ponts et chaussées, Nantes, France – centrifugeuse 88, Corté (éd.) – 1988 Balkema, Rotterdam, ISMN 90 61 91 8138, 193-200.
- Chebbo G. (1992). Solides des rejets urbains de temps de pluie : caractérisation et traitabilité. Thèse de doctorat ENPC, 413 p.
- Circulaire n° 2001-39 du 18 juin 2001 relative à la gestion des déchets du réseau routier national.
- Circulaire conjointe du MATE et du METL du 15 février 2000 sur la planification des déchets du bâtiment et des travaux publics
- Circulaire de 14 janvier 1977 relative à l'autorisation des déversements, écoulements, jets, dépôts et autres faits susceptibles d'altérer la qualité des eaux superficielles, souterraines et de la mer dans les limites territoriales.
- Décret n° 2002-540 du 18 avril 2002 relatif à la classification des déchets : rubriques 17 05 03 à 17 05 06.
- [Darmendrail D., Prez J.P. et Six P. \(1991\). Devenir des produits de curage d'un cours d'eau pollué. Exemple de la Marque \(Nord\).](#) TSM, 2, 75-87.
- Delattre C., Bertrand-Krajewski J.L., Picard V., Berga P. et Baladès J.D. (1998). Characteristics and treatability of deposits from urban catchments, sewer systems and storage tanks. Proc. NOVATECH'1998, 1, 559-566
- Delolme C., Winiarski T., Crosnier J., Février L., Hébrard C. et Plassard F. (1999). Le transfert des métaux lourds dans les ouvrages d'infiltration des eaux pluviales. Approche physico-chimique et biologique. Bulletin du GFHN 43-44, 101-105.

[Domas J., Struillou R., Lapeyre C., Lefebvre F. et H elaine D. \(1999\). Valorisation en tranchées ou en chaussées de sables issus de boues de curage des réseaux d'assainissement.](#) Bulletin du GFHN, 42-43, 43-50.

[Domas J., Struillou R., Lapeyre C., Méchin J.M., Lefebvre F. et H elaine D \(2000\). Valorisation de sables issus de boues de curage de réseaux d'assainissement : exemle de remblayage de tranchée.](#) TSM, 9, 91-99.

Gigleux M., Leglize P. et Claire J. (2000). Etude préliminaires physico-chimique et toxicologique des boues de bassin décanteur-deshuileur en vue de leur épandage. Rapport SETRA-CETE, 67 pages.

Gromaire M.C. (1998). La pollution des eaux pluviales urbaines en réseau d'assainissement unitaire, caractéristiques et origines. Thèse doctorat ENPC, 507 p.

Helaine D. (2000). Les boues de curage des réseaux d'assainissement; caractéristiques et techniques de traitement/valorisation. TSM, 4, 44-48.

Jacopin C., Bertrand-krajewski J.L. et Desbordes M. (1998). Caractérisation et décantation des solides de rejets urbains séparatifs pluviaux dans un bassin de retenue enherb e. Proc. NOVATECH'1998, 1, 551-558.

Lee P.K.. (1996). Contribution à l'étude de la contamination de l'hydrosphère par les métaux lourds en domaine autoroutier. Thèse doctorat, univ. Orléans, 284 p.

Lee P.K., Touray J.C., Baillif P, Ildefonse J.P. (1997) ; Heavy metal contamination of settling particles in a retention pond along the A-71 motorway in Sologne, France. The Science of the total Environment, 201, 1-15.

Legret M., Divet L. et Juste C. (1988). Migration et sp eci ation des métaux lourds dans un sol soumis à des épandages de boues de stations d'épuration à très forte charge en Cd et Ni. Wat. Res. 22, 953-959.

Legret M., Le Marc C., Demare D., Colandini V. (1995), Pollution par les métaux lourds dans un bassin de décantation recevant des eaux de ruissellement d'origine routière. Environ. Technol., 16, 1049-1060.

Lissalde A.M (2002).caractérisation traitement e valorisation des sous-produits d'assainissement pluvial. Mémoire de fin d'études, ENSP, 82 p.

Loi n o 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau

Loi n o 92-646 du 13 juillet 1992 relative à l'élimination des déchets

Marot F. (1998).Caractérisation et traitement de sédiments de dragage contenant des polluants métalliques. Rapport BRGM n o 278, 330 p.

Nightingale H. (1987). Accumulation of As, Ni, Cu, and Pb in retention and recharge basins soils from urban runoff. Water Resources Bulletin, 23, 4, 663-672.

Norme Hollandaise pour les sols pollués. 9 mai 1994. Valeurs cibles et valeurs d'intervention.

ONR (2001) Enquête sur les déchets. Bassins et fossés, propreté des aires d'arrêt et des abords de la route, les produits de démolition. 36 p.

Pagotto C., Remy N., Legret M., Le Cloirec P. (2001). Heavy metal pollution of road dust and roadside soil near a major rural highway. Environmental Technol., 22, 307-319.

Ruban V., Parlanti E., Riff e C., Ambl es A. et Jambu P. (1998). Migration of micro-pollutants in a dredging amended soil in Northern France. Agrochimica, XLII, 1-2,59-71.

Ruban V. et Lumière L. (1999). Transfert hydrique des métaux traces dans un sol amend e avec des boues de curage de cours d'eau – suivi à long terme. Bulletin du GFHN, 42-43, 152-157.

Ringeling R. (1996). Soil remediation in the port of Rotterdam- Physical processing of contaminated soil by the Delft University of Technology within the framework of the ECEPA-life project. September 1996, 49 p. Department of Raw Materials Technology of the Delft University of technology. TU Delft, Applied Earth Sciences.

Sadowy S. et Lerestif A. (1998). Caractérisation et réemploi des terres issues de l'entretien routier. Rapport LRPC Aix en Provence, LRPC St Brioux, SETRA.

Sermanson A., 1998. Définition et optimisation de filières de traitement et de valorisation de sous-produits d'assainissement au sein de la Communauté Urbaine de Bordeaux., projet de recherche A5, GARIH, 47 p.

SETRA, 1995. Produits de curage des fossés et des bassins routiers : quantification, caractérisation et filières d'élimination, rapport d'étude B9531, juillet 1995.

Yousef YA, Hvitved-Jacobsen T, Harper HM et Lin LY. (1990). Heavy metal accumulation and transport through detention ponds receiving highway runoff. *Sci. Total Environ.* 93, 433-440.

Yousef YA, Hvitved-Jacobsen T, Sloat J et Lindeman W. (1994). Sediment accumulation in detention or retention ponds. *Sci. Total Environ.* 146-147 : 451-456

Page: 1

[\[1\] Glossaire..](#)

Page: 4

[\[2\] Et l'amiante?](#)

Page: 5

[\[3\] ?](#)

Page: 8

[\[4\] Pas explicite!](#)

Page: 9

[\[5\] Est-ce une norme ou les valeurs des VDSS de l'ESR français ? Si c'est les VDSS il faut les abandonner! Elles n'existent plus!](#)

Page: 15

[\[6\] Glossaire](#)

Page: 16

[\[7\] La bibliographie doit être mise à des normes communes à toutes les fiches.](#)



Centre scientifique et technique
Service environnement et procédés innovants
3, avenue Claude-Guillemin
BP 6009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34