

*Utilisation des mâchefers en techniques routières
dans le département du Calvados*

Cahier des charges de l'utilisateur

Décembre 1998
R 40365



Synthèse

Les usines d'incinération d'ordures ménagères produisent des tonnages importants de scories dont une grande part de mâchefers. Un moyen de valoriser ces mâchefers est de les utiliser comme matériau de substitution, en particulier dans le domaine des techniques routières. La DDASS du Calvados, soucieuse de la protection des eaux superficielles et souterraines a avancé la nécessité de réaliser un cahier des charges définissant les règles d'utilisation des mâchefers, et précisant dans quelles conditions et dans quel secteurs l'utilisation en est convenable, tolérée ou exclue. La DIREN de Basse-Normandie a transmis cette demande au Service Géologique Régional qui a été chargé de la rédaction du document, dans le cadre de sa mission d'appui aux administrations chargées de la police des eaux.

Le document établi présente d'abord les grands traits de la réglementation, le mode de gestion et les caractéristiques chimiques et mécaniques des trois types de mâchefers, les règles d'utilisation en techniques routières et les précautions qu'il convient de prendre.

Puis, afin d'éviter les risques de pollution des milieux naturels et en particulier des eaux souterraines, il a été procédé au recensement des différents paramètres de sensibilité, et à l'étude de leur aptitude vis à vis de l'utilisation des mâchefers.

Les paramètres environnementaux importants sont la présence d'un aquifère, la nature géologique du substratum, la nature et l'épaisseur des formations superficielles, le degré d'humidité du milieu, la proximité d'un cours d'eau ou d'un ouvrage AEP.

C'est la présence d'eau dans l'espace d'utilisation des mâchefers, ou à proximité, qui est l'élément le plus important, autorisant ou non la mise en oeuvre de mâchefers sur les chantiers routiers. Afin d'éviter les risques de relargage de substances polluantes et leur transfert vers l'aquifère, il convient de proscrire l'utilisation des mâchefers lorsque la nappe phréatique est proche de la surface du sol, non protégée par des formations superficielles imperméables, ou lorsque le milieu est naturellement saturé, de manière temporaire ou continue (marécages, sols hydromorphes, zones inondables...) ainsi qu' à proximité d'un ouvrage destiné à l'Alimentation en Eau Potable (AEP).

Une grille d'évaluation des sites de chantiers routiers permet de procéder à l'examen de tous les paramètres de sensibilité, et de déterminer l'aptitude de ce site à l'utilisation des mâchefers. La grille propose quelques cas d'exclusion ferme d'un site pressenti. Chaque projet de tracé routier pourra être soumis à la grille d'évaluation, mais il sera le plus souvent nécessaire de découper ce tracé routier en autant de tronçons que de formations géologiques et de conditions hydrogéologiques rencontrées.

Il est recommandé de réserver l'utilisation des mâchefers pour les gros chantiers routiers afin d'éviter le saupoudrage dans la nature de ce matériau potentiellement polluant.

D'une manière générale, la traçabilité des matériaux utilisés en géotechnique dans les milieux naturels est toujours souhaitable, et celle des mâchefers mis en oeuvre dans les techniques routières est particulièrement recommandée.

*Utilisation des mâchefers en techniques routières,
dans le département du Calvados*

L'une des missions de service public du Service Géologique National consiste en un appui technique à l'adresse des Administrations chargées de la police de l'eau. Dans ce cadre, la Direction Départementale de l'Action Sanitaire et Sociale du département du Calvados a formulé une demande transmise par la Direction Régionale de l'Environnement au Service Géologique de Basse-Normandie.

Cette demande porte sur l'utilisation des mâchefers issus des usines d'incinération d'ordures ménagères dans le domaine de la construction des routes et vise à reconnaître, dans le département du Calvados, les zones sensibles voire déconseillées au regard de l'utilisation de ce matériau de substitution.

Dans le détail il est souhaité que les points suivants soient abordés :

- caractéristiques chimiques des mâchefers stabilisés, polluants potentiels ;
- règles d'utilisation en techniques routières ;
- organisation des chantiers et des travaux routiers ;
- définition de zones selon leur aptitude à l'utilisation des mâchefers ;
- liste des investigations à réaliser par les maîtres d'ouvrages avant d'engager un chantier routier.

Sommaire

Synthèse	p 3
Introduction	p 6
1- Réglementations et généralités concernant les mâchefers	p 7
1-1- Réglementation en matière de gestion des mâchefers	p 7
1-2- Quelques généralités sur les mâchefers	p 7
2- Caractéristiques et gestion des mâchefers de qualité « V », « M » ou « S »	p 8
2-1- Caractéristiques chimiques	p 8
2-2- Contrôles prévus en sortie des UIOM	p 9
2-3- Contrôles sur les plates-formes de maturation	p 10
2-4- Les polluants potentiels	p 10
2-5- La maturation	p 11
2-6- Le stockage temporaire sur plate-forme de maturation	p 11
2-7- Caractéristiques mécaniques des mâchefers	p 12
3- Règles d'utilisation en techniques routières, précautions générales	p 12
3-1- Utilisations possibles en techniques routières	p 13
3-2- Remblais compactés	p 13
3-3- Sous-couches routières	p 13
3-4- Couche sous revêtement goudron	p 14
3-5- Utilisation sous revêtement poreux, absorbeur	p 14
3-6- Remblai de tranchées avec canalisations métalliques	p 14
3-7- Réalisation de drains et systèmes drainants	p 14
4- Organisation des chantiers routiers	p 15
4-1- Importance des chantiers, mémoire des travaux	p 15
4-2- Stockage sur chantiers	p 15
5- Autres utilisations possibles pour les mâchefers	p 15
6- Définition des paramètres de sensibilité	p 16
6-1- Quels sont les paramètres de sensibilité et comment les classer ?	p 16
6-2- Aptitude des différents paramètres de sensibilité à l'utilisation des mâchefers	p 17

*Utilisation des mâchefers en techniques routières,
dans le département du Calvados*

7- Localisations géographiques sommaires	p 20
7-1- Quelques zones aptes à la mise en œuvre des mâchefers	p 20
7-2- Zones sensibles nécessitant réflexions et précautions	p 20
7-3- Zones à éviter complètement	p 21
7-4- Récapitulatif : aptitude des grandes unités géographiques et géologiques	p 22
8- Grille d'évaluation d'un site, à remplir pour chaque projet de chantier routier	p 23
8-1- Présentation de la grille/niveaux d'aptitude à l'utilisation des mâchefers	p 23
8-2- Mise en œuvre pratique de l'évaluation d'un site	p 23
Conclusion	p 25
Annexe	p 26

Introduction

Aujourd'hui, les Usines d'Incinération d'Ordures Ménagères (UIOM) ne doivent plus seulement éliminer les déchets en les brûlant, produisant ainsi un peu d'énergie. Elles doivent également veiller à la qualité des fumées produites, limiter au maximum les rejets liquides et assurer une combustion de bonne qualité produisant des mâchefers aptes, si possible, à être valorisés.

A la sortie des usines d'incinération, ces mâchefers peuvent présenter deux niveaux de qualité. Les uns sont directement utilisables car suffisamment stabilisés, les autres doivent subir une maturation de quelques mois pour tenter de parvenir à la stabilisation.

Le principal débouché des mâchefers, sous-produit des usines d'incinération des ordures ménagères, est aujourd'hui leur utilisation dans le domaine des techniques routières où ils sont employés en sous-couches routières de forme, de fondation ou de base. Ils sont également utilisables en remblais compactés.

A priori, les mâchefers mis en oeuvre dans les chantiers routiers ou les remblais de plates-formes sont stabilisés et doivent donc se comporter en matériaux inertes. Cependant, les retours d'expérimentation sur d'assez longues durées ne sont pas nombreux ; il est raisonnable d'imaginer, dans le temps, une possibilité de fuite d'une partie des constituants des mâchefers. Les éléments éventuellement relâchés seraient susceptibles d'occasionner à terme une pollution des sols et des eaux de nappe ; c'est pourquoi il est prudent d'envisager une utilisation réfléchie des mâchefers dans le domaine routier, voire d'exclure cette utilisation dans certaines conditions environnementales défavorables.

Notre étude se propose de conduire cette réflexion dans la forme et les termes définis par demande de la DDASS du Calvados.

Cette démarche reste du domaine de la précaution, mais elle affirme une certaine sagesse qui ne saurait être démentie par les leçons de l'histoire industrielle récente.

1 - Réglementations et généralités concernant les mâchefers

1-1- REGLEMENTATION EN MATIERE DE GESTION DES MACHEFERS

La réglementation en matière de gestion des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères, repose essentiellement sur trois textes :

- la loi du 15 juillet 1975,
- l'arrêté du 25 janvier 1991,
- la circulaire du 9 mai 1994.

Nous indiquerons uniquement les points principaux qui permettent de mesurer l'importance de chacun de ces textes.

- loi du 15 juillet 1975

La loi du 15 juillet 1975, modifiée par les lois des 13 juillet 1992 et 2 février 1995, donne la définition du déchet et fixe le cadre général de l'élimination de tous les déchets. Elle aborde le principe de responsabilité du producteur de déchets et offre les outils de contrôle des circuits d'élimination des déchets.

- arrêté du 25 janvier 1991

L'arrêté du 25 janvier 1991 définit les règles d'exploitation des usines d'incinération d'ordures ménagères, nouvelles ou existantes.

Il impose entre autres la séparation des cendres, des résidus et des mâchefers, qui est la première condition pour pouvoir envisager une valorisation des mâchefers.

Il fixe aussi les teneurs maximales en imbrûlés qui conditionnent la valorisation des mâchefers.

- circulaire du 9 mai 1994

La circulaire du 9 mai 1994 classe les mâchefers en 3 catégories selon leur réponse au test de lixiviation normé NF X 31210 (mâchefers "V", "M" ou "S").

La circulaire établit les conditions de valorisation des mâchefers V tant sur le plan des procédures de caractérisation (échantillonnage et analyses), que sur les conditions de mise en oeuvre.

Les normes fixées pour chacun des 3 types de mâchefers font l'objet du paragraphe 3.

1-2- QUELQUES GENERALITES SUR LES MACHEFERS

Les produits solides de la combustion des ordures ménagères représentent entre 25 et 30 % du poids initial des déchets. Ils sont composés de matériaux inertes, essentiellement des métaux, des verres, des cendres issues des produits combustibles. Après brûlage des ordures ménagères, les résidus sont composés d'environ 90% de mâchefers et 10 % de cendres volantes récupérées sur les trémies des chaudières et dans le système de dépoussiérage des installations. Les mâchefers proprement dits sont eux-même constitués de :

- 10 à 15% de métaux libres (dont environ 90% de métaux magnétiques),
- 80 à 90% de scories proprement dites,

*Utilisation des mâchefers en techniques routières,
dans le département du Calvados*

- 1 à 5% d'imbrûlés.

Dans le détail et avec plus de précisions, ces constituants se subdivisent comme suit :

- les constituants métalliques (exprimés en % du matériau sec) sont :

- 10 à 15 % de métaux ferromagnétiques,
- 0,5 à 1,5 % de métaux et alliages légers (Al essentiellement),
- 0,5 % de métaux et alliages denses (Cu, Zn, Pb, Sn ...).

- les constituants minéraux, inférieurs à 2 mm (exprimés en % du matériau sec) sont :

- 75 à 80 % de scories contenant du carbone,
- 5 à 10 % de scories ferromagnétiques, contenant du fer et des oxydes ferreux et ferriques.

- niveaux de qualité des mâchefers

Les mâchefers sont débarrassés des métaux magnétiques par déferrailage, après quoi ils sont utilisés, traités ou stockés en fonction de leurs caractéristiques physiques et chimiques et de leur potentiel polluant. Ils sont alors classés en 3 catégories :

- mâchefers à faible fraction lixiviable, directement destinés à la valorisation (dénommés "V")
- mâchefers intermédiaires, devant subir une maturation avant utilisation (dénommés "M")
- mâchefers à forte fraction lixiviable, inutilisables, voués au stockage (dénommés "S")
 - ✓ Les mâchefers de qualité "V" peuvent être directement utilisés en techniques routières, avec les précautions qui seront évoquées par la suite.
 - ✓ Les mâchefers de qualité "M" devront faire l'objet d'une maturation en vue de leur valorisation. On observe en effet, avec le temps, une carbonisation naturelle qui conduit à une stabilisation du potentiel polluant des mâchefers ; ce processus demande en général de 2 à 4 mois. L'humidité de ces produits en stock est d'environ 15 %. Les installations de maturation qui traiteront les mâchefers intermédiaires sont des installations classées pour la protection de l'environnement, soumises à autorisation dans le cadre de la rubrique 322 A de la nomenclature des Installations Classées.

Il existe des traitements complémentaires à la simple maturation, et en particulier l'adjonction de liants hydrauliques qui visent à réduire le potentiel polluant. Les mâchefers ainsi traités sont dits stabilisés ; pour être utilisables, les mâchefers intermédiaires maturés et les mâchefers stabilisés doivent répondre aux critères et conditions de valorisation des mâchefers à faible fraction lixiviable dits "V".

- Les mâchefers de qualité "S", à forte fraction lixiviable ne sont pas valorisables et doivent être dirigés vers des installations de stockage permanent autorisées.

2 - CARACTERISTIQUES ET GESTION DES MACHEFERS DE QUALITE "V", "M" OU "S"

2-1- Caractéristiques chimiques : Normes de la circulaire du 09 mai 1994

L'élimination des mâchefers d'incinération des résidus urbains et les conditions de leur valorisation en techniques routières, sont réglées par la circulaire DPPR/SEI/BPSIED/FC/FC n° 94-IV-1, en date du 09 mai 1994. Cette circulaire est accompagnée de 6 annexes.

L'annexe III concerne les caractéristiques des différentes catégories de mâchefers.

L'appartenance d'un lot de mâchefer à l'une des catégories "V", "M" ou "S" est fixé sur la base d'un test de potentiel polluant défini dans l'annexe II de la circulaire.

Les caractéristiques des différents mâchefers sont les suivantes :

- mâchefers à faible fraction lixiviable dits "V" :

- taux d'imbrûlés < 5%
- fraction soluble < 5%
- potentiel polluant pour chaque paramètre :

Hg < 0,2 mg/kg

Pb < 10 mg/kg

Cd < 1 mg/kg

As < 2 mg/kg

Cr⁶⁺ < 1,5 mg/kg

SO₄²⁻ < 10 000 mg/kg

COT < 1 500 mg/kg

- mâchefers intermédiaires dits "M" :

- taux d'imbrûlés < 5%
- fraction soluble < 10%
- potentiel polluant pour chaque paramètre :

Hg < 0,4 mg/kg

Pb < 50 mg/kg

Cd < 2 mg/kg

As < 4 mg/kg

Cr⁶⁺ < 3 mg/kg

SO₄²⁻ < 15 000 mg/kg

COT < 2 000 mg/kg

- mâchefers à forte fraction lixiviable dits "S" :

Ils présentent au moins l'une des caractéristiques suivantes :

- taux d'imbrûlés > 5%
- fraction soluble > 10%
- potentiel polluant pour chaque paramètre :

Hg > 0,4 mg/kg

Pb > 50 mg/kg

Cd > 2 mg/kg

As > 4 mg/kg

Cr⁶⁺ > 3 mg/kg

SO₄²⁻ > 15 000 mg/kg

COT > 2 000 mg/kg

2-2 - CONTROLES PREVUS EN SORTIE DES UIOM.

Les arrêtés d'autorisation d'exploitation des usines d'incinération de résidus urbains ne comportent généralement pas de normes chimiques applicables à la composition des mâchefers produits par combustion.

Des directives sont données pour la collecte et le stockage des déchets puis leur élimination. A ce titre, il est précisé, par exemple, dans l'arrêté préfectoral du 28 mai 1997 autorisant la poursuite de l'exploitation de l'usine d'incinération de Colombelles par la SIRAC :

- "les déchets et résidus produits doivent être stockés, avant leur valorisation ou leur élimination, dans des conditions ne présentant pas de risques de pollution (prévention d'un lessivage par les eaux météoriques, d'une pollution des eaux superficielles et souterraines...), pour les populations avoisinantes et l'environnement"
- "les stockages temporaires, avant recyclage ou élimination des déchets spéciaux, doivent être réalisés sur des cuvettes de rétention étanches et si possible être protégés des eaux météoriques"
- "les mâchefers et les cendres seront déposés après extinction dans un réceptacle étanche permettant une collecte de l'eau d'égouttage."

2-3- CONTROLES SUR LES PLATES-FORMES DE MATURATION

Les arrêtés d'autorisation d'exploitation des installations de traitement de mâchefers ne précisent généralement pas les normes de composition chimique des produits issus de la maturation. Ce sont en fait les dispositions de la circulaire du 09 mai 1994 qui font référence dans ce domaine.

En revanche, l'arrêté préfectoral fait part de règles précises concernant le rejet des eaux résiduaires et le sort des déchets issus des installations de traitement. Des dispositions sont stipulées pour éviter tout risque de pollution des eaux souterraines ou superficielles.

2-4- LES POLLUANTS POTENTIELS

Les études réalisées sur la composition chimique des mâchefers donnent une idée précise des éléments polluants qui risquent de se retrouver relargués dans les sols par action des eaux de percolation.

- composition chimique globale :

Les pourcentages des différents minéraux constituant les mâchefers sont variables selon l'origine des matériaux et les différentes études dans ce domaine ; c'est pourquoi nous ne donnerons pas ici de valeurs chiffrées. Les minéraux identifiés sont les suivants : SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , SO_3 , K_2O , Cl .

- polluants potentiels :

Les principaux polluants potentiels sont identifiés dans les normes de la circulaire du 09 mai 1994 ; il s'agit essentiellement de métaux lourds (Hg, Pb, Cd, Cr), de produits toxiques (composés d'arsenic, sulfates), de carbone organique.

Cependant, les mâchefers sont également susceptibles de contenir Ni, Mn, Co, Ti, Zn, V, Rb, Mo, Ba, Sn, Cu, B, Sr, Zr, N...

2-5- LA MATURATION

La maturation s'opère sur une plate-forme où le mâchefer reste stocké pendant en moyenne, 2 à 4 mois, parfois jusqu'à un an. La maturation se développe en présence d'oxygène de dioxyde de carbone, à température et humidité suffisantes. La maturation améliore sensiblement les caractéristiques des mâchefers, à l'exception de leur teneur en sulfates. L'objectif de cette opération est de faire passer les mâchefers de qualité "M" à la qualité "V". Les principales transformations observées au cours de la maturation sont les suivantes :

- une baisse importante du COT
- une baisse légère de la fraction soluble (par recombinaison de certaines espèces solubles), voire une baisse importante due à une lixiviation par les eaux de pluie.
- une baisse de la teneur en plomb qui évolue parallèlement à la baisse du pH.
- une augmentation des sulfates (mais les teneurs de départ sont généralement faibles)
- les chlorures (composants essentiels de la fraction soluble) évoluent très peu, sauf s'ils sont soumis au lessivage.
- les propriétés mécaniques des mâchefers ne sont généralement pas modifiées par la maturation.

Les phénomènes de maturation peuvent se résumer comme étant l'ensemble des réactions chimiques suivantes :

- apports extérieurs : O₂ et CO₂ ; production de H₂O
- oxydation des métaux ferreux :
$$2 \text{Fe} + 3/2 \text{O}_2 \text{ ---> Fe}_2\text{O}_3 + \text{chaleur}$$
- hydroxydation des métaux lourds :
$$\text{Métal} + \text{H}_2\text{O} \text{ ---> Métal(OH)}_x + \text{H}^+$$
- dissolution du sulfate de calcium (conduisant à l'accumulation des sulfates):
$$\text{CaSO}_4 \text{ ---> Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-}$$
- carbonatation :
$$\text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-} \text{ ---> CaCO}_3$$
- dissolution de la chaux :
$$\text{Ca(OH)}_2 \text{ ---> Ca}^{2+} + 2 \text{OH}^-$$

2-6- LE STOCKAGE TEMPORAIRE SUR PLATE-FORME DE MATURATION

Les conditions de stockage sont définies de manière à conduire à l'amélioration des caractéristiques des mâchefers. Des dispositifs d'étanchéité doivent être mis en place pour récupérer les eaux de lixiviation qui sont contrôlées et traitées si nécessaire.

2-7- CARACTERISTIQUES MECANQUES DES MACHEFERS

l'utilisation des mâchefers en génie civil impose également des caractéristiques mécaniques précises. Sans entrer dans le détail, nous donnerons ici les valeurs courantes pour quelques paramètres importants.

CARACTERISTIQUES MECANQUES	Proctor normal	Proctor modifié
Teneur H ₂ O optimale (%)	15 - 21	9 - 17
Poids volumique apparent sec optimal (kN/m ³)	14,1 - 17,1	16,9 - 19,0
Indice portant immédiat à l'optimum	19 - 30	30 - 120
Indice portant immédiat à W optimale + 2 %	10 - 18	10 - 28
Indice C.B.R. à l'optimum	22 - 30	30 - 110

3 - Règles d'utilisation en techniques routières Précautions générales

La circulaire du 09 mai 1994 définit dans son annexe V, les utilisations admissibles des mâchefers à faible fraction lixiviable en techniques routières et assimilées. Ces utilisations ne visent que les mâchefers de qualité "V", mais les plus gros tonnages produits concernent la qualité "M" augmentée des mâchefers stabilisés. Il convient donc d'élargir les utilisations en techniques routières à ces catégories de résidus qui doivent in fine accéder à la catégorie "V", après maturation ou (et) traitements. L'annexe VI de la circulaire du 09 mai 1994 précise d'ailleurs que chaque lot de mâchefer déposé sur une plate-forme de maturation *"fera l'objet d'une appréciation de sa qualité par un échantillonnage adéquat ou une analyse statistique de sa composition moyenne. Si les résultats obtenus ne sont pas conformes aux caractéristiques des mâchefers à faible fraction lixiviable ("V"), le lot sera maintenu sur le site ou expédié ... vers une installation de stockage permanent..."*

Au regard des utilisations envisagées, et en fonction des différentes expériences menées, il a été établi que les trois paramètres essentiels régissant le comportement d'un ouvrage routier comportant des mâchefers d'UIOM, sont :

- l'évolution en fonction du temps,
- la percolation lente au travers de l'ouvrage,
- les conditions de pH du milieu, le plus souvent tamponné (pH de 7 - 8)

3-1- UTILISATIONS POSSIBLES EN TECHNIQUES ROUTIERES ET PROBLEMES POSES

Les utilisations possibles sont essentiellement de deux natures :

- dans les structures routières les aires de parking, les mâchefers "V" ou "M" après maturation, peuvent constituer des couches de forme (couches inférieures), de fondations (couches intermédiaires), ou de base (couches supérieures) ;
- dans le domaine des remblais, les mâchefers "V" ou "M" après maturation, peuvent être utilisés à condition d'être compactés sur une épaisseur ne dépassant pas 3 mètres.

3-2- REMBLAIS COMPACTES

Les remblais ne pourront être réalisés avec des mâchefers que si les conditions d'utilisation satisfont aux exigences suivantes :

- le matériau devra être compacté et ne pas excéder une hauteur de 3 m ;
- aucun dispositif d'infiltration ne devra être implanté dans le mâchefer compacté ;
- afin de préserver le mâchefer des contacts avec les eaux météoriques et d'infiltration, la surface au dessus du remblai compacté sera :
 - une structure routière ou de parking (revêtement bitumineux imperméable),
 - un bâtiment couvert protégeant le remblai de l'infiltration des eaux de pluie,

Il est déconseillé d'effectuer des remblais avec des mâchefers au contact d'ouvrages d'art.

3-3- SOUS-COUCHES ROUTIERES

Les mâchefers sont utilisables à différents niveaux en sous-couches routières, qu'il s'agisse des couches inférieures (couches de forme), des couches intermédiaires (couches de fondation) ou des couches supérieures (couches de base). Pour répondre à ces utilisations, les mâchefers doivent être préparés, en particulier sur le plan de la granulométrie. Ils doivent présenter une granularité voisine de celle des matériaux naturels auxquels ils se substituent (le plus souvent, 0-20 mm à 0-40 mm environ).

Les mâchefers stabilisés par adjonction d'un liant à base de chaux sont déconseillés pour la mise en oeuvre des couches routières de forme. L'ettringite est un minéral qui peut alors se former par combinaison chimique et être la source de gonflements importants.

Dans le cadre des utilisations en sous-couches routières, des constats d'impact ont pu être faits. L'impact est donné par des concentrations supérieures au niveau de référence qui sont la conséquence de l'entrée d'eau dans l'ouvrage et des circulations à son voisinage immédiat. L'apparition d'un impact est parfois constatée au bout de plusieurs années, voire d'une dizaine d'années après la construction de l'ouvrage. La cause en est généralement le cumul des

mécanismes de fissuration de l'ouvrage routier qui accélère la lixiviation et le relargage des éléments.

3-4- COUCHE SOUS REVETEMENT GOUDRON ? PROBLEMES DE GONFLEMENT, GEL

L'utilisation des mâchefers dans les parties supérieures de la structure routière, c'est-à-dire en couche de base sous le revêtement goudronné, est peu conseillée ; les traitements nécessaires pour produire un mâchefer de qualité, utilisable en couche de base, sont trop complexes et onéreux pour être retenus. En effet, dans cette position, les mâchefers sont souvent soumis au gel, ce qui risque de provoquer des gonflements de la chaussée et la destruction du revêtement par éclatement et craquelures, si le matériau utilisé n'est pas parfaitement adéquat.

Il existe également un risque d'attaque chimique du revêtement de goudron par les constituants du mâchefer.

3-5- UTILISATION SOUS REVETEMENT POREUX, ABSORBEUR.

L'association entre les mâchefers et un revêtement absorbeur est à déconseiller pour la raison évidente que ce dispositif ne peut que favoriser et accélérer une éventuelle lixiviation des mâchefers et le relargage de substances polluantes dans le milieu (sol, puis nappe).

3-6- REMBLAI DE TRANCHEES AVEC CANALISATIONS METALLIQUES

Les mâchefers peuvent avoir un effet corrosif sur les conduites souterraines métalliques. Cette corrosion provient très certainement de l'attaque directe par les lixiviats, et de phénomènes électrochimiques à l'intérieur des mâchefers. Il semble donc nécessaire d'éviter cette utilisation.

Pour l'acier zingué, le fer et la fonte ductile, après une corrosion initiale, il se forme une couche protectrice qui empêche les corrosions graves. Sur le plomb, il n'a été constaté aucune attaque.

3-7- REALISATION DE DRAINS ET SYSTEMES DRAINANTS.

La fonction d'un drain est de concentrer et canaliser des eaux d'infiltration circulant dans la zone non saturée ; les matériaux utilisés pour la confection d'un drain sont donc par nature fréquemment immergés. C'est précisément ce qu'il faut éviter aux mâchefers pour supprimer ou réduire les risques de lixiviation du matériau et le relargage d'éléments polluants dans les eaux souterraines. Il est donc tout-à-fait contre-indiqué d'utiliser des mâchefers pour réaliser des drains ou des systèmes drainants.

4 – Organisation des chantiers routiers

4-1- IMPORTANCE DES CHANTIERS, MEMOIRE DES TRAVAUX

Il est essentiel de conserver la mémoire de l'utilisation des mâchefers et des lieux de leur mise en oeuvre. C'est pourquoi il serait prudent de tenir à jour, sur le plan départemental, un fichier et (ou) une carte des points d'utilisation des mâchefers, en techniques routières ou pour d'autres utilisations.

La traçabilité de ce matériau de substitution est indispensable ; c'est une nécessité pour assurer le contrôle du suivi de qualité des eaux souterraines, détecter et comprendre d'éventuelles pollutions qui pourraient apparaître dans le futur.

Par ailleurs, afin d'éviter le saupoudrage des mâchefers et la multiplicité des sites, il apparaît rationnel de n'utiliser les mâchefers, dans la mesure du possible, que dans le cas de chantiers routiers importants. Pour les petits chantiers consistant en une réfection très localisée et rapide du réseau routier, il vaut mieux préférer l'utilisation de matériaux traditionnels naturels.

4-2- STOCKAGE SUR CHANTIERS

Sur les chantiers routiers, le stockage des mâchefers est à éviter si possible, et dans tous les cas à limiter au temps minimum.

Dans certains cas, il se peut que le stockage temporaire se montre indispensable. Il conviendra alors de prendre des mesures conservatoires particulières :

- recherche d'une aire de stockage sur un terrain aussi imperméable que possible (argiles, marnes, zone cimentée ou goudronnée...)
- éventuellement, décapage léger du terrain, pour sauvegarder les terres de culture et atteindre les horizons imperméables, s'ils sont proches,
- dans le cas de terrains perméables, pose d'un film d'étanchéité sur la surface de stockage,
- dans tous les cas, installation d'un système de drainage et de concentration des eaux de percolation,
- éventuellement contrôle chimique des eaux résiduelles (pour information) récupération et élimination de ces eaux (dans le cadre réglementaire).

5 - Autres utilisations possibles pour les mâchefers

Aujourd'hui, la valorisation des mâchefers est surtout tournée vers l'utilisation en techniques routières, mais il existe aussi d'autres domaines de mise en oeuvre.

L'une des voies de recherche est la valorisation des mâchefers dans la fabrication des bétons ; il est possible d'incorporer des mâchefers dans les bétons, en substitution des sables et graviers, en particulier pour des éléments de béton peu sollicités, non armés et non apparents. Ceci peut s'appliquer aux bétons de remblayage, de fouilles, de fondations ou encore aux éléments préfabriqués.

Une autre voie de recherche est l'utilisation des mâchefers dans la confection de mortiers destinés au comblement ou au confortement des carrières souterraines. Les mâchefers doivent être stabilisés ainsi que le mortier mis au point, dont ils sont le principal constituant ; ce mortier doit également être assez fluide pour pouvoir être pompé. Cette technique a connu une application industrielle dans l'opération de confortement des carrières de la ZAC de Beaulieu, à Caen en 1996.

- Les mâchefers issus des Usines d'Incinération des Ordures Ménagères (UIOM), ne sont pas les seuls sur le marché. Il existe aussi les mâchefers provenant des Déchets Industriels Spéciaux (DIS), qui peuvent également être utilisés en techniques routières ; leur comportement est quasiment identique à celui des mâchefers issus d'UIOM.

- Enfin, il faut également signaler qu'il existe un procédé plus efficace que l'inertage par les liants hydrauliques ou par vitrification : il s'agit de la cristallisation lente des mâchefers qui aboutit à des cristaux de type spinelle, réputés les plus stables. Compte tenu du coût du procédé, l'économie du projet repose sur la possibilité de valoriser efficacement les cristallisats obtenus.

6 - Définition des paramètres de sensibilité

6-1- QUELS SONT LES PARAMETRES DE SENSIBILITE ET COMMENT LES CLASSER

La problématique de l'utilisation des mâchefers en techniques routières est la suivante : dans certaines conditions d'utilisation, et avec le temps, les mâchefers risquent de relâcher une partie de leur stock de minéraux (en particulier les minéraux lourds). Ceux-ci risquent alors de passer dans les eaux de nappe et de les polluer ; le phénomène, une fois amorcé, pourrait être une source de pollution importante et continue. Afin d'éviter de telles situations, il convient de considérer dans un premier temps les paramètres qui contrôlent le niveau de sensibilité des terrains et des nappes.

Par la suite, à la lueur de ces paramètres, et au cas par cas, les secteurs concernés par un projet d'emploi de mâchefers pourront être caractérisés en zones dépourvues de risques, en zones sensibles nécessitant des précautions d'emploi ou en zones complètement déconseillées pour la mise en oeuvre de mâchefers.

Les paramètres contrôlant la sensibilité des terrains et des nappes au regard de l'utilisation des mâchefers dans les travaux routiers sont donc les suivants :

- existence ou non d'un aquifère reconnu,
- nature du substratum,
- épaisseur de la zone non saturée,
- nature et épaisseur des formations superficielles,
- degré d'humidité du milieu,
- proximité d'un cours d'eau,
- proximité d'un ouvrage AEP.

Considérés séparément, ces 7 paramètres sont tous importants ; cependant, certains d'entre eux (nature du substratum) peuvent n'être déterminants qu'au regard d'un autre paramètre (épaisseur de la zone non saturée).

Le paramètre placé en dernière position (proximité d'un ouvrage AEP), est en fait très important. Il est le seul à faire référence à un élément à caractère anthropique, alors que tous les autres paramètres sont à caractère naturel ; c'est pourquoi il a été placé à part en fin de liste.

6-2- APTITUDE DES DIFFERENTS PARAMETRES DE SENSIBILITE A L'UTILISATION DES MACHEFERS

- existence (ou non) d'un aquifère reconnu au niveau du chantier envisagé :
 - lorsqu'un aquifère est reconnu au niveau du chantier routier envisagé, le site doit être considéré a priori comme défavorable à l'utilisation de mâchefers en sous-couches routières ; cependant, c'est l'examen de certains paramètres plus précis, tels que l'épaisseur de la zone non saturée, l'existence d'un écran protecteur..., qui seront déterminants dans la décision finale.
 - lorsqu'il est avéré qu'aucun aquifère n'existe au niveau du chantier routier envisagé, le site peut être considéré, au regard de ce paramètre, comme propice à l'utilisation de mâchefers en sous-couches routières.
- nature du substratum :

Les formations perméables sont généralement le siège d'un aquifère phréatique, pour lequel il convient donc d'éviter tout risque de pollution en provenance des mâchefers par délestage éventuel de minéraux. Ceci nécessite dans la suite de la démarche, la prise en considération d'autres paramètres, et en particulier de l'épaisseur de la zone non saturée.

- les roches calcaires, la craie, les sables et graviers sont le siège des principaux aquifères ; à ce groupe s'associent les formations superficielles susceptibles d'être également aquifères (arènes granitiques, alluvions). Pour l'ensemble de ces formations, l'utilisation des mâchefers en sous-couches routières semble a priori défavorable. Cependant, c'est l'examen de tous les autres paramètres déterminants qui permettra de fixer un choix définitif.
- les roches siliceuses (grès, arkoses, poudingues...), les roches schisteuses (schistes, cornéennes) et les roches magmatiques (granites et granitoïdes) sont toutes généralement fracturées et à ce titre sont souvent le siège d'aquifères discontinus de type "milieu fissuré". Il convient donc de les considérer comme des formations sensibles nécessitant des précautions et l'examen des autres paramètres déterminants.
- les roches imperméables n'abritant pas d'aquifères, telles que les argiles et à un degré moindre, les marnes, ne présentent pas de restriction à l'utilisation des mâchefers en techniques routières.

*Utilisation des mâchefers en techniques routières,
dans le département du Calvados*

- épaisseur de la zone non saturée (ou profondeur du toit de la nappe) :

Les épaisseurs des terrains non saturés doivent être considérées après décaissement exigé par le chantier.

Plus la zone non saturée est réduite, (faible profondeur de nappe), plus grands sont les risques de passage de substances polluantes, car l'effet de filtration naturelle des terrains s'en trouve d'autant diminué. Il est ici question de terrains non saturés, mais non karstiques.

Il faut compter avec la mobilité saisonnière des nappes et toujours considérer la cote des plus hautes eaux connues qui détermine l'épaisseur la plus faible de zone non saturée.

- zone non saturée > 15 m → secteur pouvant convenir à l'utilisation des mâchefers.
- 8 m < zone non saturée < 15 m → secteur sensible soumis à une utilisation réfléchie des mâchefers.
- zone non saturée < 8 m → secteur pour lequel l'utilisation des mâchefers est tout à fait déconseillée.

- nature et épaisseur des formations superficielles :

Les épaisseurs des formations superficielles doivent être considérées après décaissement exigé par le chantier.

Les formations superficielles, par leur nature et leur épaisseur, peuvent avoir une influence déterminante sur la décision d'utiliser ou non les mâchefers pour la réalisation des sous-couches routières.

- formations superficielles perméables et siège d'un aquifère : leur cas est considéré dans le paramètre "nature du substratum".
- formations superficielles perméables, non aquifères : les limons éoliens quaternaires.

Cette formation peut constituer un filtre convenable dès lors qu'elle est assez épaisse.

- ✓ épaisseur des limons > 10 m → secteur pouvant convenir à l'utilisation des mâchefers.
- ✓ 5 m < épaisseur des limons < 10 m → secteur sensible soumis à une utilisation réfléchie des mâchefers.
- ✓ épaisseur des limons < 5 m → secteur pour lequel l'utilisation des mâchefers est tout à fait déconseillée.
- formations superficielles imperméables : les argiles à silex (sur craie), les argiles de décalcification (sur divers calcaires).
 - ✓ épaisseur > 3m → secteurs pouvant convenir à l'utilisation des mâchefers
 - ✓ épaisseur < 3m → secteur sensible soumis à une utilisation réfléchie des mâchefers, compte tenu du fait que la mise en oeuvre de mâchefers en sous-couches routières nécessite généralement un décaissement supérieur à 1m. Par ailleurs, le calcaire sous-jacent ne doit pas être karstique.

- degré d'humidité du milieu :

Pour ce paramètre, c'est en particulier le pôle constitué par les marécages, les zones humides, les secteurs inondables et les sols hydromorphes qui représente une contre-indication à la mise en oeuvre de mâchefers sur les chantiers routiers. En aucun cas il n'est recommandé de

s'exposer à une immersion même temporaire des mâchefers constituant une sous-couche routière. Les marécages, les zones humides protégées et répertoriées sont des milieux faciles à éviter ; en revanche, un terrain peut sembler sain et sec en période estivale et se révéler inondé ou hydromorphe pendant plusieurs mois d'hiver et de printemps.

- terrains non humides dont la perméabilité et l'état "hors d'eau" sont bien établis → secteur pouvant convenir à l'utilisation des mâchefers.
- terrains présentant des risques d'hydromorphie (existence d'un niveau imperméable situé entre 3 et 5 m de profondeur) → secteur sensible soumis à une utilisation réfléchie des mâchefers.
- zones très humides, → secteur pour lequel l'utilisation des mâchefers est tout à fait déconseillée :
marécages, zones humides définies par les services de l'Environnement,
 - ✓ zones inondables par débordement des cours d'eau ou par remontée et débordement d'une nappe. Les premières sont partiellement recensées dans "l'atlas régional des zones inondables",
 - ✓ terrains hydromorphes présentant un niveau imperméable situé à moins de 3 m de profondeur.

- proximité d'un cours d'eau :

La proximité d'un cours d'eau accentue le risque de passage de substances polluantes issues des mâchefers dans les eaux superficielles. Le transfert peut se faire par migration au sein des terrains encaissants sous l'action du ruissellement ou du déplacement des fronts humides circulant en zone non saturée superficielle, après les précipitations.

- chantier routier sans cours d'eau visible à proximité → secteur pouvant convenir à l'utilisation des mâchefers.
- chantier routier situé à proximité d'un cours d'eau, avec $d > 30$ m → secteur sensible soumis à une utilisation réfléchie des mâchefers.
- chantier routier très proche d'un cours d'eau, avec $d < 30$ m → secteur pour lequel l'utilisation des mâchefers est tout à fait déconseillée.

- proximité d'un ouvrage AEP :

Les risques de contamination d'un forage ou d'un captage destiné à l'Alimentation en Eau Potable conduisent à bannir l'utilisation des mâchefers à proximité des ouvrages.

- chantier routier situé hors de tout Périmètre de Protection (PP) et à $d > 300$ m d'un ouvrage AEP → secteur pouvant convenir à l'utilisation des mâchefers.
- chantier routier situé dans un vaste Périmètre de Protection éloignée, mais à $d > 300$ m de l'ouvrage AEP → secteur sensible soumis à une utilisation réfléchie des mâchefers.
- chantier routier situé dans un Périmètre de Protection éloignée ou rapprochée ou à $d < 300$ m de l'ouvrage AEP → secteur pour lequel l'utilisation des mâchefers est tout à fait déconseillée.

La distance de référence choisie est de 300 mètres ; cette distance nous semble représenter une précaution satisfaisante pour assurer éventuellement une fonction de filtre efficace.

Au regard des différents paramètres de sensibilité et à leur niveau d'aptitude à l'utilisation des mâchefers en technique routière, il est possible de donner quelques indications géographiques sur les secteurs à exclure, à considérer avec précautions, ou sans problèmes particuliers. Les deux paragraphes suivants répondent partiellement et dans les grandes lignes à ces questions d'aptitude.

7 - Localisations géographiques sommaires selon les différentes aptitudes des formations à l'utilisation des mâchefers

Les commentaires et descriptions ci-après peuvent être suivis et visualisés en observant deux documents cartographiques relatifs au Calvados :

- Carte hydrogéologique du département du Calvados à 1 / 100 000 (1991).
- Schéma départemental des carrières du Calvados à 1 / 100 000 (1997). Il constitue une synthèse cartographique géologique.

Dans le détail, il sera plus précis de se reporter également à l'observation des cartes géologiques à 1 / 50 000 et 1 / 80 000.

7-1- QUELQUES ZONES APTES A LA MISE EN OEUVRE DES MACHEFERS

Quelques zones dépourvues d'aquifère ou faiblement aquifères se montrent aptes à l'utilisation des mâchefers en sous-couches routières. Il en va de même pour des secteurs où la nappe est bien protégée par des formations superficielles étanches.

- zones dépourvues d'aquifères :

Les argiles et marnes du Callovien et de l'Oxfordien (vallée de la Dives au sens large) sont aptes à l'utilisation des mâchefers ; (il faut bien sûr exclure le domaine marécageux de la basse vallée de la Dives et les lits majeurs des cours d'eau).

- zones très faiblement aquifères :

Le domaine du bocage, correspondant aux schistes du Briovérien, très faiblement et irrégulièrement aquifère, est un secteur favorable à l'utilisation des mâchefers, à l'écart des zones hydromorphes et inondables.

- secteurs où la nappe est bien protégée :

Dans le Bessin, le Bathonien est assez fortement couvert par les limons éoliens quaternaires qui assurent une certaine protection de la nappe ; cette couverture n'est pas uniforme et il convient d'examiner l'épaisseur des limons et la situation des tracés routiers dans le détail de vérifier qu'il n'existe pas de karst pour s'assurer que l'utilisation des mâchefers est possible sans restrictions.

7-2- ZONES SENSIBLES NECESSITANT REFLEXIONS ET PRECAUTIONS

Les secteurs répondant à ce niveau d'aptitude doivent faire l'objet d'un examen attentif de tous les paramètres exprimant la sensibilité :

- nappes peu protégées : dans certaines zones les aquifères sont protégés par des formations sus-jacentes (souvent des formations superficielles) qui assurent une filtration naturelle des eaux en transit. Cependant, ces dispositions ne s'appliquent pas à l'ensemble du territoire du département :
 - l'aquifère du Trias discontinu et hétérogène est essentiellement développée au nord-ouest du département ; il est relativement peu protégé entre Saint-Paul-du-Vernay et Neuilly-la-Forêt.
 - l'aquifère bajocien, dans sa partie libre, est très peu protégé, aux alentours de Bayeux, en particulier à l'ouest (jusqu'à Mandeville-en-bessin), à l'est (Sommervieux, Esquay-sur-Seulles) et au sud (Chouain, Audrieu, Lingèvres).
 - l'aquifère bathonien du sud de la plaine de Caen est peu protégé : les plaquages de limons quaternaires sont peu nombreux et de faible extension depuis Ifs, Cagny, Vimont, Saint-Sylvain, Rocquencourt, jusqu'à Falaise, Morteaux-Couliboeuf et la limite du département.
 - les aquifères discontinus de type milieu fissuré concernant les granodiorites et les formations paléozoïques ne sont généralement pas protégés par des formations sus-jacentes. Ceci concerne les grès du synclinal bocain, et le massif granitique de Vire.
 - la nappe discontinue des arènes granitiques n'est pas non plus protégée ; le secteur géographique concerné est celui du massif de Vire.
 - les nappes alluviales, en particulier celles de la basse vallée de l'Orne et de la Touques ne sont pas protégées.
 - nappes peu profondes :
 - la nappe du Bathonien est peu profonde dans la bande côtière entre Vers-sur-mer et Ouistreham, ainsi que le long de la vallée de l'Orne, entre Caen et la mer.
 - ailleurs, les cotes topographiques de chaque site considéré doivent être comparées aux courbes isopièzes moyennes figurant sur l'atlas hydrogéologique du Calvados, ou à des informations piézométriques locales plus précises issues de la Banque du Sous-Sol ou d'une étude hydrogéologique.

En ce qui concerne l'aquifère du Bathonien, signalons que le SDAGE fixe pour une de ses grandes orientations la réservation de cette ressource remarquable mais particulièrement sensible aux pollutions de surface.

- proximité des cours d'eau :

Ce paramètre ne nécessite pas de localisations géographiques particulières ; il est facile à observer sur une simple carte topographique.

7-3- ZONES A EVITER COMPLETEMENT

- zones marécageuses :

- le cours inférieur de l'Aure, entre Trévières et la baie des Veys ; il est marécageux et régulièrement inondé.
- la basse vallée de la Dives depuis Mery-Corbon est marécageuse et toujours en eau.
- la basse vallée de la Touques entre Pont-l'Evêque et Touques est marécageuse, parcourue de nombreux fossés.

- zones de remontées de nappe avec débordement :

- le secteur de Bretteville-sur-Odon est sujet à des remontées irrégulières mais assez fréquentes de la nappe du bajocien.
- sur la côte, entre Saint-Aubin-sur-mer et Courseulles-sur-mer, la nappe du Bathonien qui est peu profonde, déborde quelquefois les années très pluvieuses ; les désordres vont de l'inondation des caves jusqu'à l'émergence et l'écoulement des eaux en surface.
- les vallons et vallées sèches.

- zones inondables :

Les zones inondables les plus remarquables sont définies sur l'atlas régional des zones inondables établi par la DIREN en 1996 ; il convient de se reporter à ce document pour localiser ces secteurs inaptes à l'utilisation des mâchefers en techniques routières.

- périmètres de protection des ouvrages AEP :

Pour savoir si un projet de chantier routier se situe dans un Périmètre de Protection rapprochée ou éloignée, il convient de se reporter aux archives de la DDASS ou de la DDAF, dépositaires des documents cartographiques des Périmètres de Protection.

7-4- RECAPITULATIF : APTITUDE DES GRANDES UNITES GEOGRAPHIQUES ET GEOLOGIQUES

Pour résumer les observations faites sur les différents paramètres de sensibilité et sur les différentes formations géologiques du département, il est possible d'indiquer une aptitude globale pour les grandes unités géologiques ou groupes de formations géologiques. Cette aptitude globale reste une tendance ; elle ne dispense pas de considérer tous les paramètres, pour chaque site d'utilisation potentielle de mâchefers.

Les formations géologiques sont considérées du sud-ouest vers le nord-est du Calvados, des terrains les plus anciens vers les terrains les plus récents :

- Schistes et grès du Briovérien (bocage) : secteur convenable (sans risques majeurs).
- Massif du granite de Vire et ses cornéennes : secteur possible (précautions, utilisation réfléchie).
- Terrains primaires du synclinal bocain : secteur possible (précautions, utilisation réfléchie) ; c'est un domaine complexe comportant dans le détail des secteurs déconseillés.
- Couverture secondaire, du Trias au Bathonien : secteur très complexe présentant à la fois des secteurs convenables, des secteurs possibles et des secteurs déconseillés --> à considérer avec beaucoup de soin et de prudence.
- Terrains du Callovien et de l'Oxfordien, lorsqu'ils sont argileux ou marneux : secteur convenable (sans risques majeurs).
- Terrains du Crétacé (Pays d'Auge) :
 - sur les plateaux recouverts d'argiles et en l'absence de bétoires ou de marnières proches, secteur convenable (sans risques majeurs),
 - sur flancs et fonds de vallées, secteurs déconseillés (risques importants).
- Vallées alluviales (Touques et affluents, Dives, Orne, Aure) : secteurs déconseillés (risques importants).

Ces grandes tendances restent indicatives et ne doivent servir qu'à garder en mémoire les grandes lignes fixées pour l'utilisation des mâchefers en techniques routières.

8 - Grille d'évaluation d'un site, à remplir pour chaque projet de chantier routier

8-1- PRESENTATION DE LA GRILLE / NIVEAUX D'APTITUDE A L'UTILISATION DES MACHEFERS

Cette grille d'évaluation d'un site de chantier s'adresse aux maîtres d'ouvrage ; elle reprend tous les paramètres de sensibilité et indique pour chacun la possibilité d'un classement en trois niveaux d'aptitude à l'utilisation des mâchefers en technique routière :

- 1er niveau d'aptitude → utilisation exclue ou déconseillée : cette colonne comporte deux types de cases susceptibles d'être cochées.
 - case circulaire (○) : lorsque ce type de case se trouve coché, c'est l'indication d'une exclusion impérative des mâchefers dans la mise en oeuvre des sous-couches routières. Au cours de l'examen d'un site, si **une seule** de ces cases circulaires se trouve cochée, il faut bannir toute utilisation de mâchefers sur le chantier projeté ou sur la portion de chantier concernée.

- case carrée () : lorsque ce type de case se trouve coché, c'est l'indication d'une utilisation des mâchefers fortement déconseillée. La sélection d'une ou plusieurs de ces cases n'entraîne pas nécessairement l'exclusion des mâchefers sur le site. L'exclusion dépend alors des autres paramètres et de leur niveau d'aptitude.

- 2^{ème} niveau d'aptitude → utilisation tolérée, réfléchie et précautionneuse :

Pour ce niveau d'aptitude, aucun paramètre ne condamne l'utilisation des mâchefers en technique routière ; cependant, il est prudent de considérer que 5 cases sélectionnées dans ce niveau valent une exclusion ferme.

- 3^{ème} niveau d'aptitude → utilisation convenable, ne présentant pas, a priori, de risques particuliers :

Le site sera d'autant plus apte qu'il comportera de nombreuses sélections dans ce niveau d'aptitude.

8-2 - MISE EN OEUVRE PRATIQUE DE L'EVALUATION D'UN SITE

Lorsqu'un chantier est projeté, le tracé routier doit subir une évaluation à l'aide de la grille. Chacun des paramètres de sensibilité est examiné, et tous les caractères du site pressenti sont passés en revue. Ceci conduit, pour chaque caractère, à cocher l'une des cases de l'un des trois niveaux d'aptitude à l'utilisation des mâchefers.

L'évaluation doit être menée pour des tronçons de tracé routier qui se montrent homogènes en ce qui concerne les paramètres géologiques (substratum, formations superficielles) ; un même chantier pourra ainsi donner lieu à plusieurs grilles d'évaluation successives

Lorsque tous les paramètres ont été examinés, un certain nombre de cases (ou) se trouvent cochées ; le bilan du site peut alors être effectué selon les critères suivants déjà évoqués au paragraphe précédent :

- si au moins une case de type a été sélectionnée, le site correspondant doit être exclu : il est considéré comme étant inapte à l'utilisation des mâchefers. A fortiori, la sélection de plusieurs cases de type entraîne la même conséquence.

- les cases de type qui sont cochées renseignent sur les caractéristiques du site et sur son aptitude à l'emploi des mâchefers. Cela n'exclut pas le site, sauf dans un seul cas : si globalement 5 cases ou plus sont cochées dans le niveau d'aptitude "déconseillé" et (ou) "toléré", le site doit être considéré comme inapte à l'utilisation de mâchefers, et exclu du projet.

La grille d'évaluation d'un site est insérée dans ce document, en page suivante, mais elle est également jointe au rapport sur feuillet libre, afin de faciliter la duplication.

Chaque projet de chantier devra être soumis à la grille de sélection ; il sera souvent nécessaire de découper le tracé routier en autant de portions que de changements de conditions géologiques (changement de substratum, de formations superficielles).

Conclusion

La production des mâchefers et le traitement actuellement appliqué à une partie de cette production, traitement destiné à les rendre utilisables, conduisent aujourd'hui à l'obtention de 3 types de produits de qualités différentes : les mâchefers directement valorisables, les mâchefers devant subir une maturation, les mâchefers non utilisables, devant être stockés définitivement.

Les tonnages produits sont considérables, et la valorisation de ce matériau de substitution constitue un élément économique extrêmement important ; c'est en même temps un aspect essentiel de la sauvegarde de l'environnement car les volumes de déchets ultimes s'en trouvent ainsi considérablement réduits.

C'est pourquoi les questions posées au départ de cette étude et surtout les réponses apportées et les recommandations formulées, doivent être considérées avec beaucoup d'attention, même si elles pourront, à l'avenir, se trouver modifiées et améliorées.

Annexe

IDENTIFICATION DU SITE
GRILLE D'EVALUATION D'UN SITE
**EXAMEN PRELIMINAIRE DES PARAMETRES DE SENSIBILITE
A CARACTERE NATUREL OU ANTHROPIQUE**

DOMAINE D'ETUDE <i>Paramètres de sensibilité</i>	CARACTERE DU SITE PRESSENTI	APTITUDE A L'EMPLOI DES MACHEFERS		
		Exclus * ou déconseillé	Toléré / Précautions	Convenable favorable
HYDROGEOLOGIE <i>Existence ou non d'un aquifère / nappe perchée</i> <i>Epaisseur de la Zone Non Saturée (profondeur du toit de la nappe)</i> <i>Proximité d'un cours d'eau</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Présence d'un karst - Présence d'un aquifère - Pas d'aquifère connu - Zone Non Saturée < 8 m - 8 m < Zone Non Saturée < 15 m - Zone Non Saturée > 15 m - présence cours d'eau à d < 50 m - présence cours d'eau à d > 50 m - pas de cours d'eau visible 	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
GEOLOGIE <i>Nature du substratum</i> <i>Formations superficielles (non aquifères)</i> <i>* FOSUP perméables (sur aquifère)</i> <i>* FOSUP imperméables (sur aquifère)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - calcaires, craie, sables et graviers - grès, arkoses, poudingues, schistes, granite - marnes, argiles, argiles de décalcification - épaisseur < 5 m - 5 m < épaisseur < 10 m - épaisseur > 10 m - épaisseur < 3 m - épaisseur > 3 m 	<input type="radio"/> <input type="radio"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
TYPE DE MILIEU <i>Degré d'humidité du milieu</i>	<ul style="list-style-type: none"> - marécage - zone inondable - terrain hydromorphe : prof. horizon imperméable <ul style="list-style-type: none"> * niveau imperméable < 3 m * 3 m < niveau imperméable < 5 m - terrains non humides 	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>
FORAGES, CAPTAGES <i>Ouvrage AEP public avec ou sans PP (PP=périmètre de protection)</i> <i>Ouvrage privé domestique (usage humain ou animal)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - site dans un PP rapprochée - site dans un PP éloignée à d < 300m - site dans PP éloignée (à d > 300 m du Forage) - site à d < 300 m d'un forage AEP (si pas de PP) - site hors de tout PP à d > 300 m d'un Forage - site à d < 300 m de l'ouvrage - site à d > 300 m de l'ouvrage 	<input type="radio"/> <input type="checkbox"/> <input type="radio"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>

* Une seule exclusion relevée (O) pour un seul des paramètres, vaut EXCLUSION DEFINITIVE du site testé.

BRGM
SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL
SERVICE GEOLOGIQUE REGIONAL BASSE – NORMANDIE
BP 277 - Citis "Odysée" - 14209 HEROUVILLE-SAINT-CLAIR Cedex - Tél. : (33) 02.31.06.66.40