

# VALORISATION DE MÂCHEFERS STABILISÉS POUR LE CONFORTEMENT DE CARRIÈRES SOUTERRAINES

## ÉTUDE DU COMPORTEMENT A LONG TERME

Abdelkarim Bouchelaghem\*, Marie-Claude Magnié\*, Valérie Mayeux\*\*, Anne Gobbey\*\*, Patrice Philippe\*\*

\*Inertec, \*\*Ademe

Dans le cadre de l'aménagement de la ZAC Beaulieu, la ville de Caen (France) a confié à Solétanche Bachy des travaux de confortement de carrières souterraines. En remplacement des matériaux d'extraction habituellement utilisés dans ce type de chantier, un nouveau mortier, développé tout spécialement par Inertec à partir de mâchefers d'incinération d'ordures ménagères, a été injecté en carrières par pompage.

Cette opération innovante a été soumise pendant toute sa durée à des contrôles très stricts, à la fois par un plan d'assurance qualité interne et par une commission de suivi, regroupant différents organismes de surveillance (Drire, Services Municipaux,...).

En application des travaux français et européens de normalisation sur la détermination du comportement à long terme (norme expérimentale X30-407), une étude d'impact a été entreprise par Inertec, en collaboration avec l'Ademe. Les premiers résultats de l'étude, présentés ici, semblent montrer que la présence du mortier de mâchefers stabilisés dans les carrières aura un impact négligeable sur la qualité des eaux souterraines.

Ces premiers résultats seront à comparer aux données recueillies sur site pendant plusieurs années, de façon à établir une validation fiable.

With the new development of the Beaulieu District in Caen (France), the city of Caen awarded to Soletanche-Bachy support works for underground quarries.

In place of traditional material used for this kind of works, a new mortar, based on MSWI bottom ash and specially developed by Inertec, was monitoring panel, set up by the supervisory agencies.

In application of French and European normalisation works on long term behaviour determination (X30-407 methodology), an assessment study has been started by Inertec, in collaboration with Ademe (French Agency for Environment). The first results of the study, presented in this paper, are indicating that bottom ash mortar in the quarries will have a negligible impact on underground water quality.

These first results will have to be compared to on site results during several years, in order to have a reliable validation.

## INTRODUCTION

Le premier texte normatif sur le comportement à la lixiviation à long terme a été publié en France en 1995. Il s'agit d'un guide méthodologique décrivant la démarche à respecter pour mener l'étude du comportement à long terme d'un matériau dans un scénario donné.

Inertec, qui travaille depuis plusieurs années dans le domaine de l'environnement, a décidé, en collaboration avec l'Ademe, d'appliquer cette démarche dans le cadre d'une opération innovante : le confortement de carrières souterraines à l'aide de mâchefers stabilisés, sur le site de la ZAC Beaulieu à Caen (France).

Cet article présente donc tout d'abord un bref rappel du contexte réglementaire français puis les premiers résultats de l'étude.

## PREMIÈRES RÉGLEMENTATIONS SUR LES DÉCHETS

### Présentation de la gestion des déchets en France

Avec sa première réglementation sur les déchets (1975) et une réglementation spécifique sur les installations classées (1976), la France dispose d'un système législatif efficace, basé sur le principe de la responsabilité du producteur et sur le concept de « meilleure technologie disponible » de la production à l'élimination du déchet.

Rapidement s'est alors tissé un réseau complet de centres d'élimination de déchets industriels et ménagers.

Bien que jugées trop lourdes initialement, ces nouvelles lois ont contribué au développement d'une industrie nouvelle, effectuant des efforts croissants dans le domaine de la gestion des déchets.

Le 13 juillet 1992, la loi de 1975 a été modifiée et de nouveaux principes de gestion des déchets ont été ajoutés :

- seuls déchets admissibles en centres de stockage : déchets ultimes (c'est-à-dire les déchets qui ne peuvent être ni valorisés, ni recyclés, ni retraités dans les conditions techniques et économiques acceptables),

- réduction du volume des déchets produit et/ou de leur dangerosité,

- valorisation des déchets,
- limitation du transfert de déchet, aussi bien en terme de distance que de durée.

Le 18 décembre 1992, une réglementation particulière sur le stockage des déchets industriels a repris ces grands principes et modifié considérablement les conditions de stockage de ce type de déchet, en imposant une stabilisation avant dépôt définitif.

### Cas particulier des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères

En France, les critères de valorisation (notamment en technique routière) et de stockage des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères sont définis par la circulaire ministérielle de mai 1994.

Trois classes de mâchefers sont ainsi identifiées :

- les mâchefers valorisables (dits de classe V) à faible fraction lixiviable : peuvent être valorisés directement, moyennant certaines restrictions concernant les contacts avec l'eau.
- les mâchefers intermédiaires (dits de classe M ou maturables) : ils peuvent être valorisés après maturation (pendant 12 mois au maximum) ou après traitement, s'ils respectent les critères de la catégorie V.
- les mâchefers à forte fraction lixiviable (dits de classe S) : ils doivent obligatoirement être stockés en décharge de classe II.

A l'heure actuelle, le test utilisé pour évaluer la fraction lixiviable, assimilée au potentiel polluant, est un test de conformité qui repose sur trois extractions successives selon le protocole de la norme X 31-210.

La teneur en polluant des lixiviats est ensuite comparée aux seuils définis par la circulaire ministérielle (cf figure 1), afin de déterminer à quelle catégorie appartiennent les mâchefers.

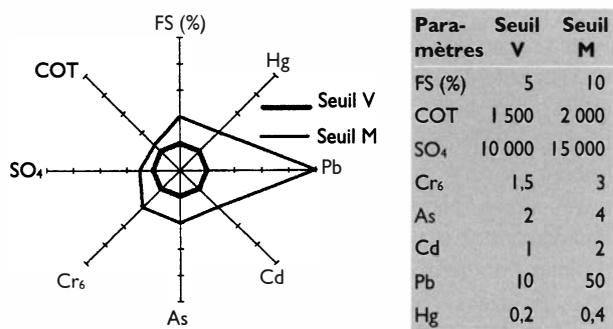


Figure 1 : Seuils réglementaires pour les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères

### UNE ÉVOLUTION PROGRESSIVE

Cependant, toutes ces nouvelles dispositions sur l'élimination des déchets n'ont pas été définies à partir d'une notion « d'impact sur l'environnement », probablement à cause du manque de données scientifiques dans ce domaine.

Ce manque de données scientifiques a souvent été compensé par le développement de nouvelles technologies qui

permettent d'améliorer les conditions d'élimination des déchets.

Il semble aujourd'hui que cette approche de la « meilleure technologie disponible » ne puisse constituer la seule réponse en terme d'objectifs et de niveau à atteindre, dans la mesure où il en va de la protection de l'environnement.

Dans ce contexte, l'Ademe (l'Agence Française pour la défense de l'environnement et la maîtrise de l'énergie) a participé depuis plus de 5 ans avec différents partenaires à de nombreuses recherches afin de permettre l'intégration d'une « logique d'impact » dans les réglementations. L'objectif est de définir des critères pour choisir la meilleure voie d'élimination reposant sur des outils fiables pour la mesure et l'évaluation de l'impact réel du déchet sur l'environnement. C'est pourquoi, il est apparu essentiel pour l'Ademe d'accompagner une opération innovante comme celle de Caen.

### OPÉRATION DE CONFORTEMENT DES CARRIÈRES DE LA ZAC BEAULIEU (CAEN 1996)

#### Présentation générale

Les carrières souterraines de Caen (France), d'un volume total estimé à plusieurs millions de mètres cubes, ont été exploitées depuis le XI<sup>ème</sup> siècle pour en extraire de la pierre calcaire, dite pierre de Caen. En l'absence de législation précise, chaque carrier menait son exploitation comme il l'entendait, au détriment de la sécurité la plus élémentaire.

Les carrières ont évolué avec le temps de façon différente, en fonction du nombre et des dimensions des piliers laissés par les carriers et de la fracturation naturelle du toit.

Là où les piliers étaient de faible section ou en nombre insuffisant, ils se sont fissurés, allant jusqu'à l'éclatement parfois, entraînant des chutes de toit dans les carrières.

Les visites de surveillance périodiques par le service des carrières de la ville de Caen ont indiqué que la très bonne qualité des terrains de couverture, formés de bancs de calcaire massifs, avait jusqu'à présent permis d'éviter les incidents en surface.

L'utilisation des terrains de surface pour l'agriculture, c'est-à-dire sans charges rapportées, ne posait pas de problème de sécurité.

Mais, dans le cadre de l'aménagement de la ZAC Beaulieu, il était impératif de conforter l'ensemble de ces carrières souterraines pour assurer la pérennité des futurs ouvrages de surface (immeubles, voiries, réseaux divers, ...).

Des travaux de confortement ont donc été confiés par la ville de Caen à Solétanche Bachy, la nature exacte des travaux dans chaque salle dépendant de son état et des charges liées à l'aménagement de surface :

Sous la future voie Georges Pompidou, l'une des zones les plus exposées, en raison de charges statiques et dynamiques importantes, un confortement par remplissage a été imposé, de même que pour les salles les plus fragilisées, où toute intervention humaine est à proscrire pour des raisons de sécurité.

Dans d'autres zones moins fragilisées, un confortement plus classique (remblaiement mécanique, mise en place de piliers) a été mis en œuvre.

Au tout début des travaux, Solétanche Bachy a proposé une variante originale : le remplissage par un mortier pompable fabriqué à partir de mâchefers d'incinération d'ordures ménagères stabilisés. La définition du process de stabilisation, le cahier des charges qualité, ainsi que les essais de contrôle ont été assurés par Inertec.

### Mise au point d'un mortier de mâchefers stabilisés

Les polluants présents dans les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères sont de deux types :

- des sels, essentiellement des sulfates solubles.
- des métaux lourds, en particulier du plomb, en partie solubilisé lors des tests de lixiviation.

Les mâchefers produits par l'usine d'incinération d'ordures ménagères de la ville de Caen se situent dans la catégorie M, à cause de la fraction soluble, du plomb et du COT dans les lixiviats.

Pour le confortement des carrières de la ZAC Beaulieu, les procédés de stabilisation développés par Inertec ont dû être adaptés pour obtenir un mélange pompable, de l'unité de production vers les carrières à remplir.

En final, une formulation innovante de mortier a été mise au point, tenant compte des contraintes de mise en œuvre, développant avec le temps une résistance à la compression suffisante et respectant les seuils de la catégorie V.

Les résultats des tests de lixiviation réalisés sur les mâchefers non traités et les mâchefers stabilisés sont présentés dans les figures 2 et 3.

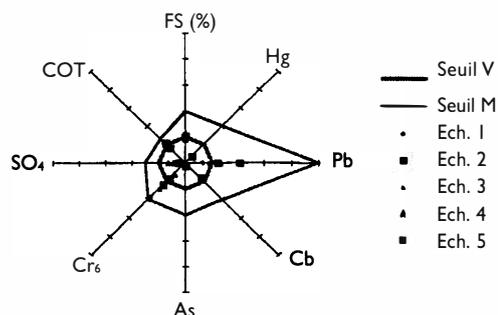


Figure 2 : Résultats de lixiviation obtenus sur les mâchefers avant traitement

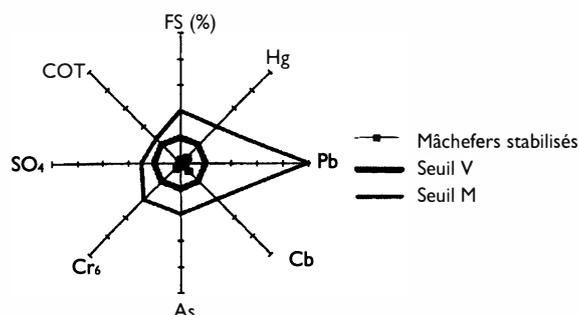


Figure 3 : résultats de lixiviation obtenus sur les mâchefers stabilisés

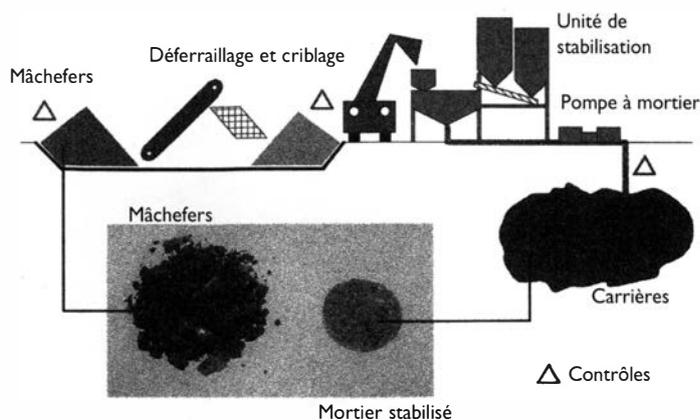


Figure 4 : Schéma de l'installation de traitement

Pour satisfaire aux exigences de la ville de Caen, maître d'ouvrage, et des organismes de contrôle (Drirc, services municipaux,...), des essais de convenance ont été réalisés afin de confirmer, à l'échelle 1, les résultats obtenus en laboratoire : pompabilité du mortier sur 600 m et respect des critères autorisant la valorisation.

Le démarrage du chantier n'a été autorisé qu'après validation des résultats par une commission de suivi, tout spécialement mise en place pour cette opération.

### Mise en œuvre industrielle

Une plate-forme de traitement complète a été installée par Solétanche sur le site de la ZAC Beaulieu, tout près des carrières à conforter. Elle peut être décrite sommairement de la façon suivante (figure 4).

Les mâchefers reçus de l'usine d'incinération sont tout d'abord déferrillés et criblés, de façon à obtenir un matériau homogène qui est temporairement stocké sur une aire étanche.

Les eaux de pluie et les eaux de lavage sont récupérées dans un bassin et recyclées comme eau de process dans l'unité de stabilisation : il n'y a aucun rejet à l'extérieur du site.

L'opération de remplissage des carrières fonctionne ensuite par campagne, la production de mâchefers étant trop faible par rapport à la cadence de l'unité de production de mortier. Les mâchefers criblés et déferrillés sont introduits dans un malaxeur avec l'eau et les réactifs de stabilisation. Après quelques minutes de malaxage, le mortier est vidangé puis pompé directement dans les carrières.

Avec le temps, ce mortier se transforme en un matériau solide, peu perméable (figure 5). Pour suivre le chantier, Solétanche Bachy a mis en place un plan d'assurance qualité pour veiller au respect des critères environnementaux.

Trois points de contrôle répartis sur la chaîne de traitement permettaient de suivre la qualité des mâchefers :

- à l'arrivée, tous les camions de mâchefers venant de l'usine d'incinération étaient échantillonnés. Le laboratoire du chantier notait leur aspect (couleurs, odeur,...) et réalisait un test de lixiviation rapide (mesure du pH et estimation de la fraction soluble), afin de s'assurer que le chargement ne



**Figure 5 : Carrière remplie avec le mortier de mâchefers stabilisés**

faisait pas partie de la catégorie S, ce qui aurait interdit son utilisation.

– ces tests rapides étaient complétés par des tests complets, réalisés en interne et en externe, à partir d'un échantillonnage du stock de mâchefers criblés et déferrillés effectué par le laboratoire de la ville de Caen.

– enfin, lors de chaque campagne, des contrôles du mortier de mâchefers stabilisés étaient effectués en interne et en externe.

Un suivi de la nappe par 3 piézomètres situés de part et d'autre des zones remplies a été mené pendant toute la durée du chantier et se poursuit encore actuellement.

Cette opération de remplissage peut être résumée en quelques chiffres :

- capacité journalière (en tonnes de mâchefers traités) : unité de criblage/déferrillage : 120 tonnes/jour ; unité de stabilisation : 400 tonnes/jour.
- durée du chantier : 12 mois.
- volume de carrières remplies : 40 000 m<sup>3</sup> environ (ce qui correspond à la production annuelle de mâchefers de l'usine d'incinération d'ordures ménagères de Caen).

## APPLICATION DE LA MÉTHODOLOGIE X30-407

### Description de l'étude

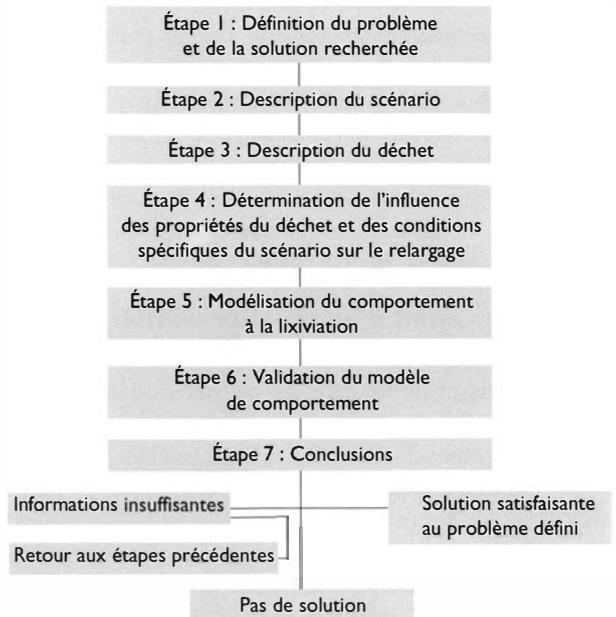
En plus des stricts contrôles réglementaires, Inertec a entrepris, en collaboration avec l'Ademe, l'étude du comportement à long terme des mâchefers stabilisés placés dans les carrières de la ZAC Beaulieu.

Suivant la méthodologie de la norme X30-407, cette étude se décompose en plusieurs étapes (figure 6).

L'objectif de l'étude est d'évaluer le terme source, c'est-à-dire, le flux de polluants issu du massif de mâchefers stabilisés. Chaque étape de la méthodologie est alors détaillée, dans le cadre précis du comportement des carrières de la ZAC Beaulieu avec des mâchefers stabilisés.

### Description du scénario

Des études réalisées par différents laboratoires sur d'autres



**Figure 6 : Méthodologie de la norme X 30-407**

déchets stabilisés ont montré qu'il était possible, dans une première itération, de négliger les facteurs mécaniques et géotechniques.

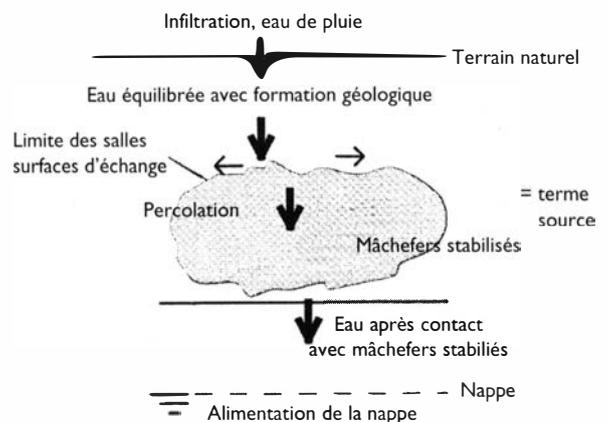
L'activité biologique est *a priori* très réduite, car au sein du matériau mis en carrière règnent un pH très basique (~ 12) et une quasi-absence d'air.

Les facteurs d'influence principaux sont donc les conditions climatiques et hydrogéologiques qui vont commander les contacts eau/mâchefers stabilisés.

Le scénario de stockage peut alors être résumé de façon schématique (figure 7).

Différentes études menées sur l'exploitation des carrières et les pompages d'eau, complétées par les données du service météorologique ont permis de rassembler des informations précises sur les conditions locales d'exposition.

Le taux d'infiltration a alors pu être estimé, à partir de la plu-



**Figure 7 : Description du scénario. Évaluation de la qualité des eaux souterraines au cours du temps**

viométrie et des mesures de température.

Le sol situé au-dessus des carrières étant considéré, en première approximation, comme saturé, toute l'eau d'infiltration parvient ensuite sur le massif de mâchefers stabilisés.

**Description du déchet**

Pour l'évaluation du comportement à la lixiviation à long terme, une caractérisation du matériau plus précise que celle menée lors des études préliminaires à la réalisation du chantier a dû être réalisée :

- caractérisation des mâchefers bruts : étude de la variabilité des espèces solubles (tests de lixiviation rapides et complets), étude granulométrique, composition chimique exacte...

- caractérisation des mâchefers stabilisés : étude de la variabilité des espèces solubles (tests de lixiviation), des caractéristiques mécaniques (notamment évolution dans le temps de la résistance à la compression), mesure de la perméabilité et de la porosité, afin de définir le régime prédominant pour le transport des polluants, composition chimique exacte,...

L'étude de variabilité des mâchefers bruts a été menée pendant plusieurs mois : chaque semaine, un échantillon était prélevé et soumis à un test de lixiviation normalisé.

L'arsenic, le chrome, le mercure et le cadmium ne sont quasiment jamais détectés. Les variations de pH et de teneur en eau sont faibles.

Les paramètres les plus sensibles sont la fraction soluble (figure 8), le plomb (figure 9) et le COT en solution, les mâchefers de Caen se situant tantôt en catégorie M, tantôt en catégorie V.

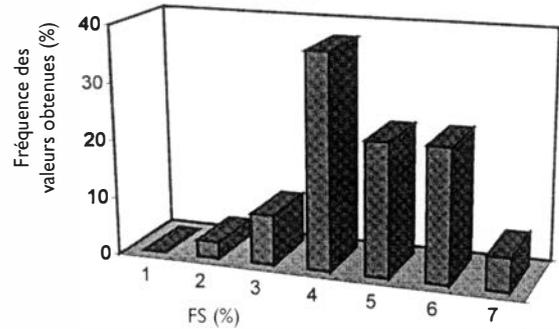


Figure 8 : Fraction soluble des mâchefers bruts

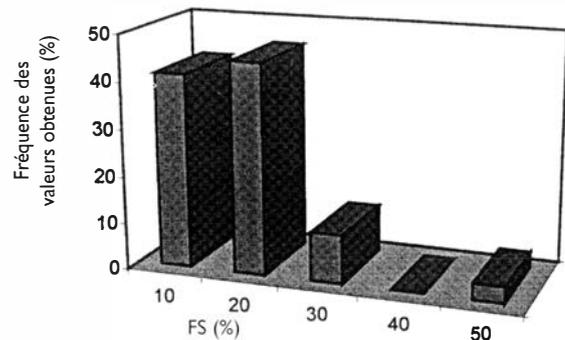


Figure 9 : Plomb lixivié (test X 31-210 sur les mâchefers bruts)

**Tableau 1 : Composition moyenne des lixiviats (test X 31-210 sur les mâchefers bruts)**

Paramètres	Résultat moyen (X31-210)
Teneur en eau	81,1 %
Fraction soluble	4,8 %
Sulfates lixiviés	1988 mg/kg
COT lixivié	1187 mg/kg
Pb lixivié	11,4 mg/kg
As, Cd, Cr, Hg lixiviés	< limites détection ICP

A partir de toutes les valeurs mesurées, une composition moyenne des lixiviats a été calculée (tableau 1) : elle semble établir que les mâchefers de Caen appartiennent plutôt à la catégorie M.

L'analyse granulométrique met en évidence une hétérogénéité apparente du matériau. Les grosses particules sont en majorité des imbrûlés (papier,...) et des morceaux de verre, qui seront considérés comme inertes pour l'étude du comportement à la lixiviation.

Une analyse élémentaire, réalisée sur différentes tranches granulométriques n'a pas permis d'établir une réelle corrélation entre concentration en polluants métalliques et taille des particules. Seul le calcium semble légèrement plus concentré dans les particules les plus fines.

En ce qui concerne les caractéristiques mécaniques des mâchefers stabilisés, deux paramètres ont fait l'objet d'un suivi dans le temps : la résistance à la compression et la perméabilité à l'eau.

On constate une évolution favorable avec le temps de maturation : la résistance à la compression augmente, tandis que la perméabilité à l'eau diminue. Après 180 jours, la résistance à la compression devient asymptotique.

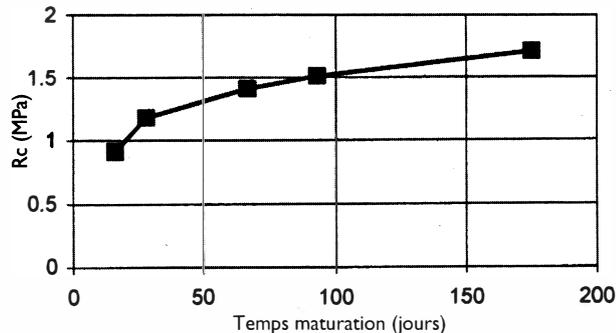


Figure 10 : Évolution de la résistance à la compression avec le temps de maturation

Après 180 jours de maturation, la perméabilité du mortier est de l'ordre de  $5 \cdot 10^{-9}$  m/s. La percolation au sein du massif de mâchefers stabilisés sera donc vraisemblablement très faible, la plus grande partie de l'eau d'infiltration ruisselant sur la surface.

D'après le test de lixiviation normalisé (X31-211), les polluants métalliques se trouvent sous une forme insoluble dans les mâchefers stabilisés : leur teneur dans les lixiviats est inférieure à la limite de détection de l'ICP.

Une analyse élémentaire montre par ailleurs que la teneur

Tableau 2 : teneur des mâchefers stabilisés en polluants métalliques	
Polluants métalliques	Teneur totale (mg/kg)
As	< 17
Cd	6,6
Cr	147
Pb	535

totale en polluants métalliques du mortier est déjà très faible (tableau 2).

Le plomb est le polluant métallique dont la teneur est la plus élevée.

Par ailleurs, les espèces majoritaires dans le mortier sont le silicium et le calcium.

Une grande partie du silicium provient des morceaux de verre qui constituent l'essentiel des grosses particules dans les mâchefers.

Quant au calcium, il provient également en grande partie des mâchefers qui ont eux-mêmes un pH supérieur à 12.

**Étude expérimentale du comportement à la lixiviation**

Cette phase consiste à préciser les facteurs susceptibles d'influencer le comportement à la lixiviation :

- nature de l'eau en contact avec le déchet dans le cas précis du scénario : eau de pluie, influencée par la proximité de la mer, après percolation dans le massif de pierre de Caen (analyse de l'eau du site, tests de recherche d'équilibre en laboratoire...).
- paramètres physiques : ils seront négligés dans un premier temps, les variations de température et de taux d'humidité étant très faibles à une distance du sol aussi importante (~ 10 m).
- paramètres mécaniques et géologiques : ils seront également négligés, après vérification, lors de l'étape précédente.

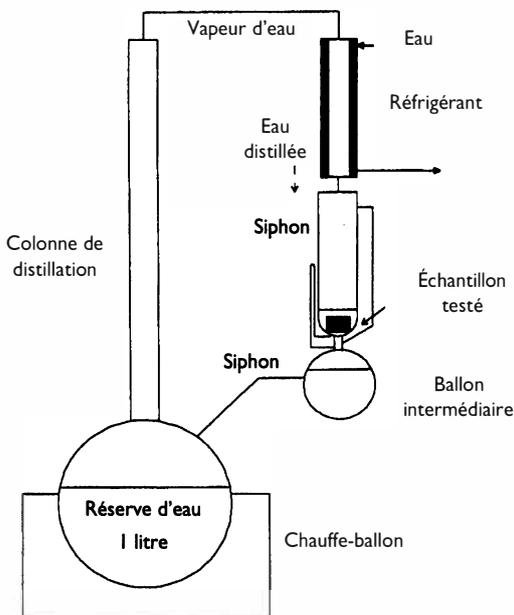


Figure 11 : Schéma du test Soxhlet modifié

te, de l'intégrité de la structure du matériau et de sa durabilité.

Le comportement à la lixiviation est dans un premier temps suivi par un test de lixiviation de longue durée (plusieurs mois) avec un appareil Soxhlet modifié (figure 11).

Ce test consiste à soumettre un échantillon du matériau étudié à un flux continu d'eau distillée, formée par évaporation d'une réserve d'eau. Le dispositif « soxhlet » original a été modifié, de façon à ce que l'eau en contact avec l'échantillon soit à température ambiante.

Après trois mois de test de lixiviation « soxhlet », les quantités de polluants métalliques extraites restent très faibles, inférieures à 2 % des teneurs totales et certains éléments ne sont quasiment pas détectés.

Pendant cette période, le flux d'eau écoulé a été voisin de 170 litres sur un échantillon de surface apparente 130 cm<sup>2</sup>. Une partie des polluants métalliques extraits de l'échantillon reprécipite sur les parois de la réserve d'eau (notamment avec des CSH), si bien qu'une attaque à l'acide fluorhydrique doit être réalisée pour pouvoir mesurer leur concentration.

Les courbes de relargage des polluants sont représentées sur la figure 12 ci-après.

D'autres espèces sont analysées en parallèle : le lithium (traceur introduit lors de la préparation des échantillons), pour suivre les mécanismes de diffusion dans la matrice, calcium, silicium et aluminium, afin de comparer la mise en solution

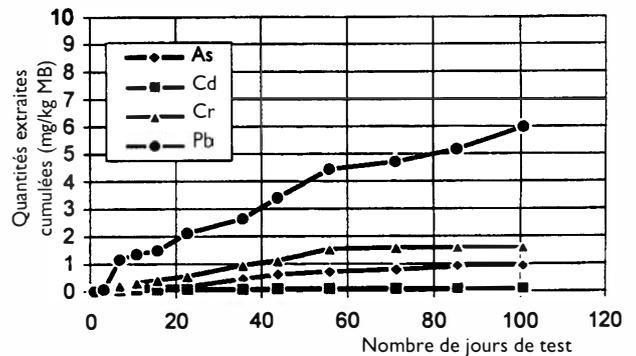


Figure 12 : Courbes de relargage des polluants métalliques

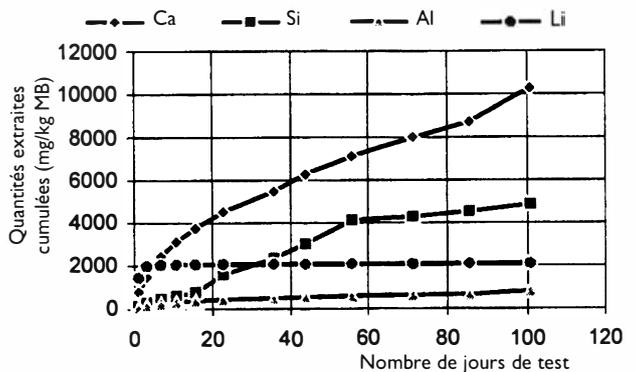


Figure 13 : Courbes de relargage des autres espèces suivies

des métaux lourds des espèces constitutives de la matrice et d'en déduire la nature des mécanismes apparents.

Seul le lithium présente un profil de diffusion caractéristique même si le test Soxhlet, trop rapide, n'a pas permis d'obtenir avec suffisamment de précision le début de la courbe de relargage. Un test complémentaire, en batch, donne pour cet élément une valeur du coefficient de diffusion de  $7.10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Tous les autres éléments en dehors du lithium présentent des profils complexes, résultant du couplage de mécanismes de diffusion et de dissolution/précipitation dont la modélisation s'avère délicate.

A l'aide d'analyses de l'eau du site et de tests de recherche d'équilibre en laboratoire, une composition moyenne de l'eau en contact avec les mâchefers stabilisés sur site a pu être établie. Il ne s'agit pas simplement de la composition d'une eau distillée en équilibre avec la pierre de Caen, la proximité de la mer modifiant la composition de l'eau de pluie dans la région de Caen.

Un test intégral a alors été mis au point, afin de se rapprocher des conditions réelles d'exposition. En complétant l'appareillage Soxhlet par un dispositif d'asservissement et à partir d'une solution d'addition synthétique, l'eau en contact avec l'échantillon de mâchefers stabilisés est maintenue à une composition constante.

Paramètres	Teneur
pH	8,1
Ca	100 mg/l
Na	13 mg/l

Les polluants métalliques ne sont pas extraits en quantités significativement différentes de celles obtenues avec le test à l'eau distillée et les courbes de relargage ont sensiblement la même allure.

En revanche, on observe une augmentation de la masse des échantillons lixiviés manifestement liée aux précipitations du calcium provenant de l'eau d'addition au contact des mâchefers stabilisés.

Des études complémentaires seront effectuées pour préciser ce phénomène.

### Modélisation du comportement à la lixiviation

Cette modélisation est réalisée à l'aide des données acquises lors des étapes précédentes, la complexité du modèle dépendant de la précision recherchée.

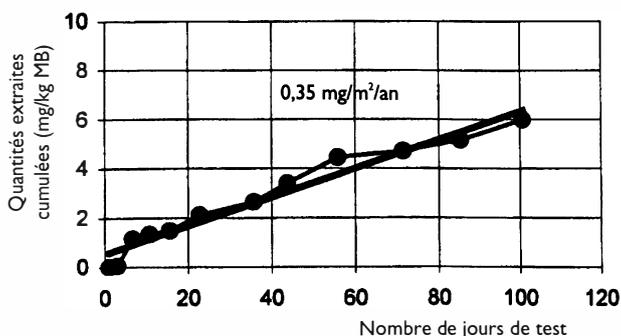


Figure 14 : évaluation du flux de plomb solubilisé

**Tableau 4 : comparaison directe entre les conditions de laboratoire et du scénario**

	Scénario	Test Soxhlet modifié
Surface de contact	1000 m <sup>2</sup>	130 cm <sup>2</sup>
Débit d'eau	160 l/m <sup>2</sup> /an	120 ml/h
Ratio liquide/solide	0,44 l/m <sup>2</sup> /jour	221 l/m <sup>2</sup> /jour
[Pb] relargué	0,23 mg/m <sup>2</sup> /an (1 jour Soxhlet = 552 jours sur site)	0,35 mg/m <sup>2</sup> /an

Dans une première itération, une modélisation simple peut être apportée par une comparaison directe entre le scénario sur site et les conditions des tests en laboratoire.

En assimilant la courbe de relargage des polluants métalliques à une droite, on peut calculer un flux émis par unité de temps et de surface.

On peut ensuite déduire les flux mis en jeu dans le cas du scénario envisagé (tableau 4).

En ramenant ce flux émis au débit d'infiltration, la concentration en plomb dans l'eau en contact avec les mâchefers stabilisés s'établit à 3,9 µg/l, bien en dessous des moyens de détection courants.

D'après les courbes de relargage (figure 12), les autres polluants métalliques donneront des concentrations encore plus faibles.

Cette modélisation simple donne une première réponse en terme d'impact. Elle fait cependant intervenir de nombreuses approximations, en particulier sur l'extrapolation des conditions expérimentales du laboratoire aux conditions réelles du scénario.

Une seconde itération a donc été entreprise, faisant intervenir un modèle numérique couplant transport dans une matrice poreuse et spéciation chimique.

Ce modèle, calé sur les résultats des tests de laboratoire, doit aboutir à une représentation minéralogique simplifiée du matériau étudié qui pourra ensuite être injectée dans un modèle géométrique se rapprochant des conditions du scénario.

Cette modélisation est actuellement en cours de réalisation, afin de prendre en compte une description aussi précise que possible du matériau, malgré l'hétérogénéité physique (présence de morceaux de verre,...)

Une validation de ces approches demande de toute façon à être effectuée.

Dans le cas de cette opération, elle pourra être apportée par des données expérimentales obtenues in situ, grâce au suivi détaillé dans le paragraphe suivant.

### Validation expérimentale du comportement à la lixiviation

Dans le cadre de cette opération de confortement de carrières, une salle a été choisie, en concertation avec la ville de Caen, pour être équipée de dispositifs permettant de suivre pendant plusieurs années un éventuel relargage de polluants et ainsi valider la démarche expérimentale de laboratoire :

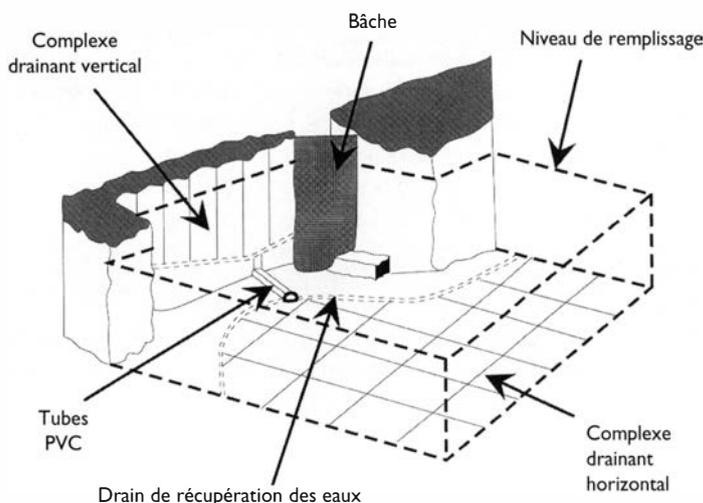


Figure 15 : Mise en place du dispositif de suivi

- pose d'un système de drainage horizontal au milieu du massif de mâchefers stabilisés, afin de recueillir l'eau de percolation,
- pose d'un système de drainage vertical, permettant de recueillir des eaux de ruissellement.

Ces dispositifs ont été installés après un remplissage partiel de la salle, qui a été ensuite totalement remplie : les systèmes de drainage sont donc en contact direct avec les mâchefers stabilisés.

L'eau présente dans cette zone est collectée et recueillie grâce à des tuyaux d'évacuation (un pour chaque système de drainage), débouchant dans la salle voisine, non remplie (figure 15).

Le système de drainage horizontal n'a, pour l'instant, pas permis de recueillir d'eau ce qui correspond aux faibles valeurs de perméabilité mesurées en laboratoire.

Le système vertical a permis quant à lui de recueillir de l'eau de ruissellement pendant l'hiver : les prélèvements analysés ont un pH basique mais des teneurs en polluants métalliques inférieures aux limites de détection de l'ICP.

Un piézomètre supplémentaire a été installé au cœur de cette salle, après la prise du mortier. Des carottes de mâche-

fers stabilisés ont par la même occasion été prélevées au cours du forage.

Au total, 4 piézomètres sont donc régulièrement relevés, afin de détecter une pollution éventuelle de la nappe (figure 15).

Jusqu'à présent, les prélèvements réalisés dans les quatre piézomètres ont des compositions voisines, même celui situé dans la salle remplie de mâchefers stabilisés. Ces teneurs sont également très proches de celle mesurée dans l'eau recueillie en carrière (composition de l'eau de ruissellement).

Une validation de la modélisation ne pourra être réalisée qu'à partir de prélèvements réalisés en nombre suffisant sur site.

Or, comme l'infiltration est fortement dépendante de la pluviométrie, le suivi devra être réalisé pendant plusieurs années.

## CONCLUSION

Cette opération originale de valorisation s'avère riche d'enseignements, à plusieurs titres.

D'une part, la valorisation de mâchefers stabilisés pour le confortement de carrières présente un intérêt tant économique qu'environnemental pour la collectivité, en évitant l'extraction de matériau naturel, coûteux, et l'élimination en centre de stockage de classe II des mâchefers.

D'autre part, d'un point de vue scientifique, elle fournit un cadre idéal pour évaluer, grâce à la méthodologie de la norme X30-407, l'impact sur l'environnement d'une valorisation des mâchefers.

Ce programme d'étude sera poursuivi sur plusieurs années, afin de réaliser une modélisation du comportement à long terme validée par les données recueillies sur site. Mais d'ores et déjà, les premiers résultats montrent que l'impact sur la qualité des eaux souterraines sera négligeable.

\* **Abdelkarim Bouchelaghem, Marie-Claude Magnié,**  
Inertec - 6, rue de Watford - 92000 Nanterre

\*\* **Valérie Mayeux, Anne Gobbey, Patrice Philippe**  
Ademe - 2, square Lafayette - BP 406 - 49004 Angers cedex 01

Future voie Georges Pompidou



Salle instrumentée (9A)

Figure 16 : emplacement des piézomètres (repérés par les codes Pz)

## Bibliographie

1. Ministère de l'Environnement ; *Élimination des mâchefers d'incinération de résidus urbains*, circulaire du 9 mai 1994.
2. Norme française XP X 30-407 ; *Méthodologie pour la détermination du comportement à long terme* ; avril 1995.
3. A. Bouchelaghem, M.C. Magnié, M. Spillemaecker ; *La mise en œuvre de la stabilisation des déchets ultimes* ; TSM numéro 12 ; décembre 1996.
4. D. S. Kosson, H. A. Van der Sloot and T. T. Eighmy ; *An approach for estimation of contaminant release during utilization and disposal of municipal combustion residues* ; Journal of Hazardous Materials, 1995.
5. A. Bouchelaghem, M.C. Magnié, E. Gastine ; *Confortement de carrières à l'aide de mâchefers stabilisés* ; TSM numéro 4 ; avril 1997.