



HAL
open science

Réduction du risque d’effondrement en surface par comblement des anciennes carrières souterraines abandonnées. Evaluation technique de l’utilisation de résidus industriels comme matériaux de remblayage

Jean-Marc Watelet

► **To cite this version:**

Jean-Marc Watelet. Réduction du risque d’effondrement en surface par comblement des anciennes carrières souterraines abandonnées. Evaluation technique de l’utilisation de résidus industriels comme matériaux de remblayage. Evaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées: séminaire de restitution et de valorisation des travaux INERIS -réseau des LPC, May 2005, Paris, France. pp.215-229. ineris-00976160

HAL Id: ineris-00976160

<https://ineris.hal.science/ineris-00976160>

Submitted on 9 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RÉDUCTION DU RISQUE D'EFFONDREMENT EN SURFACE PAR COMblement DES ANCIENNES CARRIÈRES SOUTERRAINES ABANDONNÉES. ÉVALUATION TECHNIQUE DE L'UTILISATION DE RÉSIDUS INDUSTRIELS COMME MATÉRIAUX DE REMBLAYAGE

Jean-Marc WATELET

INERIS, 60550 Verneuil-en-Halatte, France

Résumé

Dans le cadre des opérations de remblayage des anciennes cavités abandonnées, il est intéressant d'évaluer les possibilités de réutilisation de sous-produits issus de processus industriels, notamment comme charge additionnelle dans les coulis utilisés lors des comblements gravitaires.

Compte tenu du nombre et la diversité des sous-produits industriels potentiellement utilisables, ce texte présente les critères importants à vérifier dans une approche méthodologique globale, privilégiant la caractérisation du site receveur (cible) et le comportement du matériau de remblais dans sa globalité, c'est-à-dire sans considérer les caractéristiques propres à chaque constituant.

Retenons en priorité que l'analyse spécifique doit porter sur les aspects environnementaux et géotechniques et que les études doivent prendre en compte les phases de préparation du chantier, la phase travaux et des scénarios projetant le site dans le long terme.

1. Contexte général

Les cavités artificielles abandonnées et notamment les anciennes carrières souterraines affectent une superficie non négligeable du territoire national. La concentration de ces exploitations est particulièrement importante dans les régions où la variété et la qualité des matériaux recherchés étaient favorables à des extractions en souterrain (bassins sédimentaires parisien et aquitain, Sud-Est de la France...).

L'abandon progressif de l'industrie extractive et l'augmentation constante de l'urbanisation engendrent maintenant l'extension des zones bâties au-dessus de secteurs sous-cavés. Les aménageurs sont alors contraints à de prendre en compte le risque lié à la dégradation inéluctable de ces ouvrages souterrains. La plupart du temps, la solution adoptée se traduit par la suppression des vides par comblement. Le concept de ce traitement repose :

1. soit sur une réduction suffisante du volume des vides existants, dans l'optique de limiter voire d'éviter la propagation des phénomènes d'instabilité vers la surface, et ainsi, d'assurer la sécurité des populations exposées. Les remblaiements avec des produits bruts (sans liant particulier) ou par déversement gravitaire de coulis constituent à ce titre, des méthodes adaptées. Les techniques de mise en place sont variées, directement à partir du fond par des engins mécanisés ou plus classiquement depuis la surface ;
2. soit par la suppression totale des vides avec restitution contrôlée de la compacité initiale du terrain traité, permettant un aménagement pérenne de la surface sans mise en œuvre de techniques de construction particulières. Le remblaiement s'effectue alors, de manière complémentaire ou en totalité, par des injections.

Ces opérations, qui se décomposent en travaux de préparation, de remblayage proprement dit et de contrôle, supposent des contraintes techniques et engendrent parfois un coût important.

Parmi les nombreux paramètres technico-économiques à prendre en compte pour la réalisation des travaux, l'évaluation des produits de remblayage constitue un facteur non négligeable.

Tout d'abord, le volume à combler est estimé dans le cadre d'études techniques préliminaires. Cela permet au maître d'œuvre d'identifier les besoins en matériaux (selon les cas, avec une marge d'incertitude de 10 à 20 %) et de s'assurer de la disponibilité des produits à proximité du chantier sans risquer une rupture d'approvisionnement ou une baisse de qualité.

Ensuite, l'organisation du transport et les possibilités de stockage provisoire sur site sont des données complémentaires impliquant des contraintes en terme de nuisances.

Enfin, la nature du ou des matériau(x) retenu(s) représente une caractéristique primordiale pour l'opération de mise en sécurité d'un site. Le choix du matériau de remblais doit, en effet, prendre en compte :

- les propriétés de déversement et de compacité du produit. De ces propriétés, dépend en partie la qualité finale de l'opération, et notamment l'importance des vides résiduels. Les mortiers et coulis sont des mélanges réalisés à base de ciment

et d'eau avec une charge constituée de produits granulaires du type sablon (avec adjonction de cendres, de silicates ...). Ils sont en général suffisamment liquides au moment de l'injection pour s'infiltrer dans les vides résiduels et assurer une cohésion correcte après la prise en masse. Les matériaux dits « tout-venant » (granulats calcaires, terres de fouilles, matériaux issus de démolition...) bruts ou criblés sont en priorité utilisés pour les opérations de remblayage partiel ;

- les caractéristiques mécaniques. Elles doivent assurer une valeur de résistance mécanique des terrains traités, ou au minimum, garantir un confinement sur les piliers, au moment de la mise en place mais surtout dans le long terme. Ces propriétés mécaniques ne doivent pas être altérées, notamment en cas de circulation d'eau (par percolation, infiltration depuis la surface ou du fait de remontée des nappes phréatiques) ;
- l'impact sur l'environnement à court et à long terme du produit de remblayage (brut ou mélange). Les matériaux utilisés ne doivent pas présenter de risque de pollution, en particulier vis-à-vis de la ressource en eau. Dans le cas des carrières souterraines, le plus souvent exploitées au-dessus du niveau de la nappe superficielle, la configuration géologique des terrains environnants peut favoriser la percolation d'eau depuis la surface et la migration potentielle de polluants.

Ce dernier aspect est aujourd'hui examiné de manière systématique et l'appréciation technique doit prendre en considération les réglementations nationale et européenne, actuelles et à venir, sur les déchets et leur mode de gestion.

2. Dispositions actuelles relatives aux matériaux de remblayage

2.1 Nature des matériaux

Dans les opérations de remblayage de cavités abandonnées, la nature du matériau est rarement imposée de manière précise lors de l'établissement du cahier des charges.

Lorsque le comblement des cavités ne prévoit qu'un déversement de matériaux sans liants, bruts ou criblés, les spécifications portent surtout sur le poids volumique, la teneur en eau et l'angle de frottement apparent. On utilise des produits constitués de déblais tout-venant, déchets de carrières, terres de fouilles ou stériles miniers. Sont alors seulement exclus : les matériaux argileux, les débris végétaux et organiques.

Pour les opérations par injection ou déversement gravitaire de coulis, le Cahier des Clauses Techniques et Particulières (CCTP) ne souligne bien souvent que les critères de résistance mécanique (R_{c28j} , R_{c90j}) pour le produit pris en masse ou des caractéristiques de viscosité pour la pénétration dans les vides.

Pour la charge intégrée, en moyenne entre 60 à 80 % du volume de matériau solide par m^3 mis en place, elle est le plus souvent constituée de produits naturels, sable ou

« sablon » (matériau de granulométrie fine et peu étendue). Retenons également les cendres volantes issues de centrale thermique (cendres volantes pour béton conformes à la norme NF EN 450), qui lorsqu'elles sont disponibles à proximité, sont utilisées dans la composition des coulis (Nord et Région Parisienne, notamment).

2.2 Responsabilité et contrôle des produits utilisés

L'opération de remblayage est, dans tous les cas, placée sous la responsabilité du maître d'ouvrage, représenté par le maître d'œuvre.

De plus en plus, les matériaux de remblayage commencent à faire l'objet de spécifications environnementales plus précises dans les cahiers des charges. En présence ou à proximité d'une nappe superficielle, le maître d'ouvrage peut, par exemple, imposer un remblai constitué de matériaux naturels de manière à s'affranchir de tout risque de pollution à terme du site receveur.

Les cahiers des charges sont également susceptibles d'imposer des documents de traçabilité (lieu de provenance, nom du fournisseur, quantités approvisionnées, analyses éventuelles...), l'eau injectée pouvant faire l'objet de spécifications quant à sa provenance.

Le contrôle de la nature des produits de remblayage n'est cependant pas directement soumis à une autorité administrative, sauf si les matériaux sont clairement répertoriés comme déchets issus d'une ICPE.

Dans le cas de remblayage de carrières abandonnées, le contrôle du chantier par l'administration ne s'exerce que dans le cadre de la protection des travailleurs directement par l'inspection du travail.

Pour le traitement par remblayage de carrières en exploitation (devenues Installations Classées ICPE - depuis 1994), la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE) exerce un contrôle des procédures définies dans le cadre d'un arrêté d'autorisation, établissant la nature des remblais et imposant éventuellement la réalisation d'une étude d'impact.

3. Évaluation des possibilités d'utilisation de déchets industriels comme matériaux de remblayage

3.1 Intérêts d'une telle évaluation technique

Compte tenu de l'ampleur des volumes nécessaires pour combler les cavités sous-minant le territoire français et de la nécessité de gérer au mieux les ressources naturelles, il est paru intéressant d'examiner quelles étaient les diverses possibilités

pour disposer d'autres matériaux de remblais que les produits dits « nobles » classiquement utilisés.

On peut ainsi réfléchir aux possibilités de réutilisation de sous-produits issus de processus industriel, lesquels, sous certaines conditions, pourraient constituer une solution pertinente, soit sous la forme d'une charge additionnelle dans les coulis, soit directement comme matériau brut en remblayage gravitaire.

En effet, les sous-produits de processus industriel, qui ne s'intègrent pas au sein d'une filière de réutilisation ou d'élimination directe, sont généralement stockés plus ou moins temporairement par les industriels aux abords des sites de production. Si ces matériaux ne sont pas éliminés vers des décharges contrôlées, ils sont laissés sur place, ou éventuellement réutilisés localement en petite quantité, par exemple lors d'opérations de terrassement.

Il existe donc pour les industriels un intérêt à trouver de « nouveaux débouchés » pour ces stocks et de disposer d'une procédure bien encadrée pour proposer « à moindre coût » aux aménageurs privés et aux élus locaux, une solution participant à la mitigation des risques liés à l'effondrement de cavités, sous réserve d'une conformité de ces matériaux aux critères de respect de l'environnement naturel.

3.2 Rappel des cadres réglementaire et normatif sur la réutilisation des déchets

Ces matériaux étant réglementairement assimilables à des déchets, un bref rappel du cadre réglementaire et normatif s'appliquant à la réutilisation des déchets est important pour positionner l'opération de comblement des carrières par rapport aux principaux textes existants.

3.2.1 Réglementation des déchets

La réutilisation des déchets n'est actuellement pas encadrée par un (ou des) texte général, que ce soit au plan européen ou français. Ceci peut être relié à la nature très diversifiée des déchets (plus de 600 typologies de déchets), ainsi qu'au gisement important et hétérogène (plus de 600 millions de tonnes/an).

Néanmoins, la gestion des déchets reste encadrée par des textes qui fournissent des bases importantes pour le choix et l'orientation des déchets vers la ou les filières d'élimination adaptées (stockage, recyclage, incinération ou réutilisation).

Les fondements de la gestion des déchets en France reposent sur le Code de l'Environnement (Partie législative) relatif à l'élimination des déchets et la récupération des matériaux (articles 541-1 à 541-50). Ces textes transcrivent la Directive du 15 juillet 1975 (75/442/CEE), modifiée par la Directive du 18 mars 1991 (91/156/CEE), qui fixent le cadre général de la gestion des déchets.

Ces textes fondateurs ont été complétés par la Directive du 12 décembre 1991 (91/689/CEE) relative aux déchets dangereux, qui distingue différentes natures de déchets en fonction de leur dangerosité. Ils ont contribué de manière significative à la mise en place d'une liste de référence (décret n°2002-540 du 18 avril 2002 relatif à la classification des déchets).

La notion de déchet inerte, édictée par la directive européenne 1999/31/CE du 26 avril 1999 relative à la mise en décharge, définit un déchet comme inerte «*s'il ne subit aucune modification physique, chimique ou biologique importante. Les déchets inertes ne se décomposent pas, ne brûlent pas et ne produisent aucune réaction physique ou chimique, ne sont pas biodégradables et ne détériorent pas d'autres matières avec lesquelles ils entrent en contact, d'une manière susceptible d'entraîner une pollution de l'environnement ou de nuire à la santé humaine. La production totale de lixiviats et la teneur des déchets en polluants ainsi que l'écotoxicité des lixiviats doivent être négligeables et, en particulier, ne doivent pas porter atteinte à la qualité des eaux de surface et/ou des eaux souterraines.*» Par ailleurs, le guide pour la mise en décharge des déchets inertes indique qu'en cas de doute sur le caractère inerte d'un matériau, une caractérisation doit être effectuée.

3.2.2 Réglementation en fonction du cadre d'élimination

Certains textes, telle cette même Directive du Conseil 1999/31/CE ou encore la Directive 2000/76/CE du Parlement européen et du Conseil du 4 décembre 2000 sur l'incinération des déchets, font référence au mode d'élimination et à la mise en décharge. Ils ont conduit, en France, à la rédaction du guide de bonnes pratiques relatives aux installations de stockage pour déchets inertes issus du BTP (édition de juin 2004).

Concernant la réutilisation de déchets industriels, deux textes majeurs peuvent être signalés, servant fréquemment de référence pour cet usage :

- la circulaire n°94-IV-1 du 9 mai 1994 sur l'élimination des mâchefers d'incinération des résidus urbains qui permet une valorisation de certains de ces MIOM en fonction de leur potentiel polluant ;
- l'arrêté du 16 juillet 1991 relatif à l'élimination des sables de fonderie contenant des liants organiques de synthèse édicte également des règles strictes pour le stockage et la valorisation de ces matériaux en remblais et dans les bétons.

3.2.3 Cadre normatif

La normalisation fournit des outils techniques pour répondre aux exigences de la réglementation. Dans le domaine de la caractérisation des déchets, des essais simples, répétables et reproductibles ont été élaborés au niveau européen et adoptés en France.

Ainsi, la norme européenne EN 12457 partie 2, relative à la caractérisation des déchets par un essai de conformité pour la lixiviation des déchets fragmentés et des boues a été homologuée sous la référence NF X 30-402 partie 2. Son champ d'application spécifie le relargage conventionnel d'un matériau dans des conditions données, sans toutefois que les résultats n'apportent d'indications sur son comportement à long terme.

3.3 Démarche mise en œuvre

3.3.1 Approche préalable

Dans le cadre du programme d'appui technique au Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable relatif à la mitigation du risque induit par la présence de cavités souterraines, l'INERIS a mené une évaluation sur les conditions d'utilisation de déchets, issus de processus industriel, comme matériaux de comblement.

Une première sélection a permis d'éliminer des matériaux qui, malgré leur disponibilité sur l'ensemble du territoire national et leurs propriétés physiques (granulométrie, résistance..) présentent des caractéristiques environnementales impropres à une mise en dépôt dans un site non prévu à cet effet.

Parallèlement, une enquête menée auprès de différentes sources (administrations, entreprises spécialisées en remblayage, industriels...) a montré que :

- des démarches de ce type ont été réalisées au niveau local, notamment dans les régions exposées aux risques d'effondrements de cavités et fortement concernées par l'urbanisation. Des inventaires spécifiques et des études particulières sur la réutilisation des déchets en carrière ont été menés (exemple du Nord) ;
- les travaux de remblayage font partie d'un secteur d'activité relativement restreint. Les Services des Carrières, lorsqu'ils existent, et les entreprises spécialisées dans la mise en sécurité des cavités disposent d'un savoir-faire établi et d'une bonne connaissance des sources d'approvisionnement en matériaux considérés ;
- les industriels et gestionnaires de déchets ne connaissent pas forcément bien les besoins et les contraintes techniques relatives aux opérations de remblayage de cavités. On peut considérer en outre que le débouché pour ce type de réutilisation reste très ponctuel et globalement limité en volume.

Les sous-produits de démolition (notamment les produits dits de « scalpage ») sont par contre assez couramment utilisés, après recyclage, comme produits bruts dans les opérations de remblayage gravitaire à sec.

L'étude bibliographique a permis de relever que les traitements de cavités souterraines anthropiques, par remblayage avec des produits issus de processus industriels, sont régulièrement pratiqués, à l'étranger, dans les régions sous-minées de pays industrialisés d'Europe et d'Amérique du Nord (notamment au Canada). Il faut

cependant noter qu'il s'agit souvent d'opérations de remblayage dans des mines en phase d'exploitation, avec des déchets issus des processus de traitement du minerai extrait. L'environnement du site est donc déjà fortement pollué et le volet environnemental y apparaît souvent secondaire.

En France, quelques expérimentations, mettant en œuvre des matériaux particuliers, ont déjà été tentées dans le domaine du remblayage des exploitations souterraines. On citera notamment le cas des carrières souterraines à CAEN (photos) où il a été utilisé, comme charge de coulis, des mâchefers traités, pour remblayer, dans le cadre d'un chantier d'essai encadré, un volume de l'ordre de 30000 m³.

Les tendances actuelles semblent axées vers les mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) qui sont des produits bien répartis sur l'ensemble du territoire et disponibles « régulièrement » en quantités non négligeables.

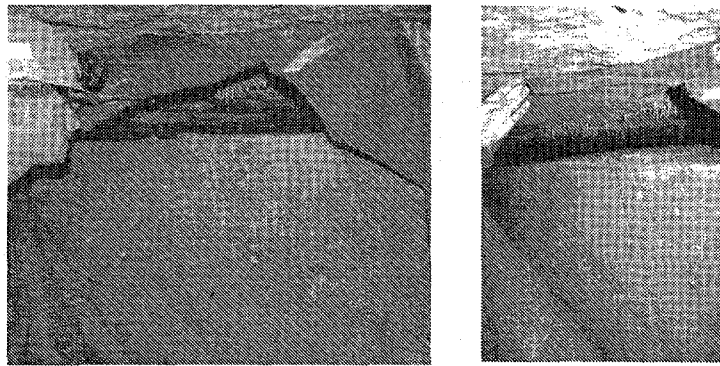


Figure 1. Carrières de CAEN : Vue rapprochée du remblais après prise en masse (juin 2001).

3.3.2 Analyse méthodologique globale

Devant, d'une part, le nombre et la diversité des sous-produits industriels existants, liée notamment à leur origine, leurs conditions de tri et de stockage, leurs procédés de stabilisation et, d'autre part, les diverses méthodes de remblayage utilisables, il s'est avéré illusoire de proposer, à l'échelon national, un répertoire des déchets potentiellement utilisables en remblayage et d'établir une consigne technique d'utilisation correspondante à chacun de ces produits.

Cette étude s'est donc orientée sur la mise au point d'une approche méthodologique globale, privilégiant les caractéristiques du site receveur (cible) et le comportement du matériau de remblais dans sa globalité, c'est à dire à l'état brut si simple comblement ou du coulis pris en masse dans le cas d'injections.

L'établissement de cette procédure technique doit s'inscrire dans une démarche continue, allant de la caractérisation préalable du site et du matériau destiné à être mis en remblais, jusqu'à son évaluation dans le long terme.

3.3.3 Suivi et valorisation d'un plot d'essai

Cette analyse méthodologique a pu s'appuyer sur des données bibliographiques relatives à quelques opérations ponctuelles passées et sur divers retours d'expérience constitués par des évaluations techniques de coulis de comblement gravitaire réalisés à partir de sous-produits de fabrication d'enduits et mortiers ou issus de travaux de génie civil.

Toutefois, l'opération la plus aboutie est actuellement menée sur un plot d'essai de remblayage, réalisé en coordination avec Aluminium PECHINEY, EDF, SURSCHISTE et GTS dans une ancienne carrière de pierre à ciment dans les Bouches-du-Rhône.

Il s'agit de tester, les conditions (géotechnique et environnementale) de mise en œuvre d'un coulis de remblayage à base de ciment, de cendres volantes LFC (« lit fluidisé circulant ») et d'une charge constituée par un déchet issu des résidus de lavage de la bauxite, la Bauxaline®.

Le coulis se présente sous un aspect liquide de teinte rougeâtre (photos) qui est déversé gravitairement dans les cavités et qui prend en masse en acquérant une résistance mécanique convenable ($R_{c\ 28j}$ de l'ordre de 2,5 MPa) et en provoquant une certaine augmentation de chaleur.

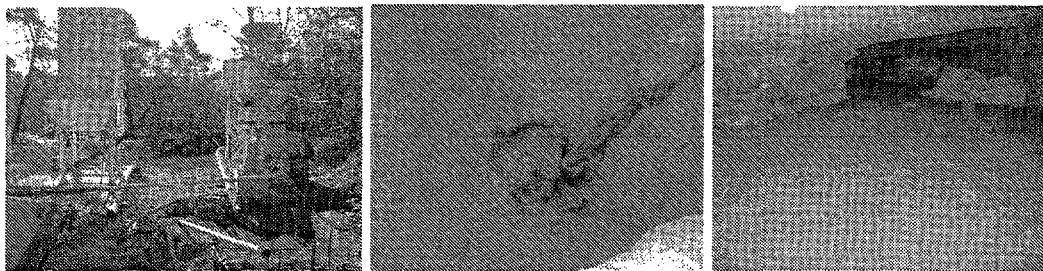


Figure 2. Plot d'essai de coulis à base de Bauxaline® : Vues du chantier, du coulis liquide et après déversement et prise en masse dans les galeries.

Les différentes approches qualitative et quantitative, portant sur la caractérisation préalable du site, les scénarios environnementaux, l'organisation et le suivi du chantier, sont, à ce titre, progressivement validées. Elles vont permettre de disposer

d'une démarche technique, adaptée au contexte particulier d'utilisation de ce coulis mais pourront surtout être généralisées à une démarche méthodologique globale.

4. Critères techniques à considérer pour l'utilisation de déchets en remblayage de cavités abandonnées

4.1 Volet géotechnique

En cas d'utilisation de déchets pour le comblement de cavités souterraines, il devient impératif de porter attention, dans les études préalables, puis au cours et après l'opération, à des critères qui ne sont actuellement pas systématiquement traités dans les cahiers des charges « classiques ».

La première remarque a trait aux enjeux et aux activités existantes en surface (loisirs, industrielles, etc.). Le stockage tampon des produits sur un site peut nécessiter des mesures d'aménagement spéciales, voire de confinement, pour maîtriser les nuisances liées à l'envol des poussières, au ruissellement ou tout simplement à l'aspect visuel des dépôts. On conçoit qu'en milieu urbain ou péri-urbain, il est préférable d'éviter tout stockage temporaire et d'alimenter le chantier au fur et à mesure.

Les conditions de transport doivent alors faire l'objet d'une vérification accrue et continue quant à la qualité et à la provenance des produits, basée sur des mesures de scellés des camions et/ou sur des contrôles de qualité, simples, rapides et adaptés aux matériaux transportés.

La seconde démarche passe par la connaissance aussi exhaustive que possible des cavités destinées à être traitées et du massif encaissant. Généralement, la configuration du site est précisée en fonction de la nature et de l'épaisseur du recouvrement, de la géométrie des vides et donc pour évaluer le volume disponible au fond (critères technico-économiques primordiaux). Le comblement par des sous-produits industriels suppose de prendre également en compte :

- le pendage et l'extension des cavités, notamment lorsqu'il s'agit de vieilles exploitations aux limites imprécises (pas de fronts de tailles, galeries éboulées...);
- la présence de vides attenants ou superposés (autres carrières, anciennes entrées, galeries isolées...);
- les moyens de confinement existants (muraillements, bâches...) et ceux qu'il est possible de réaliser, surtout lorsque le produit déversé présente un fort pouvoir de pénétration.

Cette approche nécessite de mener une inspection visuelle des galeries et peut exiger l'ouverture d'accès. La notion d'accessibilité à l'ensemble du site souterrain est impérative mais peut être valorisée par un relevé géotechnique. D'autres données

peuvent être alors validées comme la présence et la nature d'anciens remblais dans les galeries ou l'état de fracturation (orientation, continuité, ouverture et densité des fractures) et la présence de couloirs karstiques.

Les informations recueillies servent alors à établir un « point zéro » et peuvent être utilisées dans la formulation des scénarios environnementaux.

Les contextes hydraulique et hydrogéologique constituent également des priorités puisque l'eau peut à la fois être considérée comme un vecteur de pollution et comme une cible potentielle. Ainsi, l'analyse du site receveur devra prendre en compte:

- la pluviométrie en surface et l'évapotranspiration, les écoulements superficiels et les capacités d'infiltration en surface ;
- les circulations d'eaux au sein des terrains de recouvrement et les cheminements préférentiels des percolations vers les cavités ;
- la présence, la nature et les battements de la nappe superficielle, les exutoires vers le réseau hydrologique et les prélèvements industriels et privés existants.

L'utilisation de matériaux non nobles comme produits de remblayage demande donc la mise en œuvre d'études complètes, au moins pour un plot d'essai représentatif. Dans les cas complexes (milieu karstique, existence de pompages...), il convient d'envisager, dès la phase d'étude préalable, l'implantation de piézomètres, la réalisation de traçages (à partir des futures zones de comblement) et, par la suite, des contrôles continus de la qualité des eaux aux exutoires identifiés.

Enfin, outre les configurations relatives au site, il convient d'évaluer les caractéristiques géomécaniques des remblais et notamment son action vis-à-vis de la sécurisation de la surface vis-à-vis des vides résiduels, objectif initial des projets. Si ces critères techniques sont en général bien appréhendés avec l'utilisation de matériaux classiques il peut être intéressant de suivre le confinement attendu sur le massif et de vérifier l'absence de désorganisation géotechnique du milieu à la suite de l'injection et des réactions du produit dans les cavités.

4.2 Volet environnemental

Sur le plan général, l'approche rigoureuse de toute réutilisation de déchets est basée sur la caractérisation de ces matériaux, qui peut alors recouvrir deux aspects :

- une notion de caractérisation intrinsèque, impliquant la dangerosité des matériaux ;
- une notion de caractérisation du comportement dans un scénario de réutilisation, qui prend en compte l'aspect risque, c'est à dire qui intègre les concepts de site et d'exposition.

Pour répondre aux incertitudes que pourrait avoir un maître d'ouvrage sur le risque de pollution d'un site après une opération de comblement de carrières souterraines par un remblais intégrant un déchet industriel, il convient, sur le plan environnemental, de mettre en œuvre, au minimum, la démarche suivante. Cette démarche est menée concomitamment à la caractérisation géotechnique du site et intègre des périodes d'évaluation préalable et de suivi de l'état du site. Elle est organisée par modules et a pour objectif principal la connaissance du comportement à long terme du matériau.

4.2.1 Module A : description et formalisation du scénario de réutilisation envisagé

Dans un premier temps, le scénario envisagé est décrit et documenté en termes d'échelle de temps et de facteurs d'influence sur le relargage potentiel des constituants des déchets/matériaux. Il se base en grande partie sur la caractérisation préalable du site receveur pour laquelle les critères de configuration auront déjà été répertoriés, notamment vis-à-vis de l'approche hydraulique.

4.2.2 Module B : caractérisation du matériau mis en remblais

En fonction des données issues du module précédent, une hiérarchisation des facteurs prépondérants pour le scénario considéré est réalisée. L'effet des différents facteurs est évalué qualitativement et quantitativement, par exemple par l'intermédiaire d'essais de laboratoire dits paramétriques. *A priori*, on se doit de considérer trois facteurs primordiaux :

La durabilité du matériau. Ce facteur est très important pour déterminer le comportement environnemental du matériau. En effet, le comportement à la lixiviation d'un matériau solide massif et d'un matériau altéré ne fait pas intervenir les mêmes phénomènes, et n'entraîne donc pas le même impact sur l'environnement. Dans un premier temps, le caractère solide du matériau est déterminé. Il est alors intéressant d'évaluer la perméabilité de ce matériau. Dans un deuxième temps, l'influence du vieillissement sur la durabilité du matériau, et donc indirectement sur le comportement à la lixiviation est étudiée. Pour ce faire, on peut, par exemple, utiliser des essais de vieillissement artificiel accéléré (alternances de cycles humidification/séchage, ou/et de cycles gel/dégel).

Le comportement à la lixiviation. Il peut être déterminé, en fonction des caractéristiques du matériau, selon deux essais :

- dans le cas où le remblais est considéré comme suffisamment perméable ($K > 10^{-8}$ m/s) et permet la percolation des eaux du scénario considéré, on détermine le comportement à la percolation du volume de déchets granulaires perméables. Cet essai vise à déterminer les paramètres de l'émission des micro-polluants inorganiques à partir d'un remblais constitué pour tout ou partie par des déchets. Il s'agit de remblais dits percolants, c'est-à-dire à travers lesquels l'eau s'infiltrerait naturellement sous l'effet de la gravité et de la pression hydraulique ;

- dans le cas contraire où la conductivité hydraulique serait inférieure à 10^{-8} m/s, les remblais considérés génèrent une émission de polluants majoritairement par échange entre l'eau du scénario considéré et leur surface extérieure apparente. Ils sont alors testés à l'aide d'un essai de lixiviation des monolithes (essai « Test Leaching Monolith » ou TLM dynamique, ou/et soxhlet modifié). L'objectif de cet essai reste le même que celui de l'essai de percolation ascendante.

L'influence du pH. Le comportement environnemental, et en particulier la mobilité des micro-polluants inorganiques (métaux lourds), est très fortement conditionné par le pH du milieu. Deux essais paramétriques peuvent être utilisés de façon complémentaire pour mesurer l'influence du contexte chimique sur la solubilisation des polluants d'un déchet :

- l'essai d'influence du pH en conditions stationnaires qui vise à caractériser la capacité du matériau à résister à différents niveaux d'agressions acides et basiques, et l'effet de cette résistance sur la disponibilité des polluants en conditions stationnaires ;
- la détermination de la Fraction Maximale Mobilisable (FMM) pour aboutir à une estimation du maximum extractible pour une espèce donnée dans des conditions physico-chimiques imposées.

4.2.3 Module C : évaluation du transfert vers l'environnement

En fonction des caractéristiques comportementales du matériau (module B), des données spécifiques au scénario de réutilisation (module A), deux approches différentes peuvent être envisagées, de manière indépendante ou complémentaire :

Une approche par modélisation du transfert dans l'environnement vers une cible réelle ou fictive. Pour cette analyse, un choix doit être fait pour décider du point de conformité auquel on se rattache. On peut par exemple s'appuyer sur les travaux déjà réalisés dans le cadre de la directive décharge pour les décharges de classe III.

La mise en place d'un dispositif de récupération des eaux de drainage en différents points de la planche d'essai et analyse de ces eaux. Cette approche est accompagnée par la définition d'une campagne de prélèvement (nature et intervalle du suivi) et de surveillance de ces eaux. En complément et pour s'assurer de la bonne réalisation du dispositif, il convient de suivre l'évolution régulière de la qualité des eaux souterraines exposées.

4.3 Exploitation des résultats

En fonction des données qualitatives et quantitatives, acquises en respectant les approches décrites dans les volets géotechnique et environnemental, il est possible d'aboutir à un avis technique quant à la faisabilité du remblayage de carrières souterraines par des déchets issus de processus industriel.

Cet avis est bien entendu adapté à une configuration de site donné. Il permet également d'envisager d'autres chantiers dans des sites présentant des configurations identiques (environnement hydrogéologique notamment) et en se référant à un matériau présentant des caractéristiques comparables et susceptible « d'alimenter » le chantier de manière régulière et continue.

Enfin, selon le degré d'incertitude considéré dans les scénarios d'évolution à long terme, il peut être demandé une surveillance technique du site encaissant et des secteurs définis comme potentiellement exposés. Il serait en outre intéressant de conserver une trace de ces opérations, notamment si elles ne doivent être effectuées qu'en domaine privé.

5. Remarques et perspectives

Les matériaux constitués ou comprenant des déchets industriels peuvent être utilisés pour le comblement des cavités abandonnées dans la mesure où les opérations ont fait l'objet d'une analyse spécifique portant sur les aspects environnementaux et géotechniques. Ces études préalables doivent en outre prendre en compte la phase travaux et des scénarios projetant le site dans le long terme. L'approche environnementale s'applique en outre aux caractéristiques du site receveur et au produit de remblayage dans leur intégralité, et non sur une évaluation, pour chaque constituant, de seuils de pollution.

Cette démarche n'est valable que pour des opérations de remblayage utilisant des coulis dont la charge solide est constituée par des déchets. L'utilisation de déchets industriels n'est en effet pas envisageable pour un comblement (par voie humide ou sèche) par déversement de produits bruts sans liants. Seuls les déchets de déconstruction (recyclage des déchets inertes de construction et démolition) sont en fait déjà assez largement utilisés, dans ce type d'opération.

On peut aussi noter la possibilité d'utiliser les déchets particuliers dans des sites souterrains favorables car déjà « pollués » (produits plâtreux en carrières de gypse, saumures dans les mines de sel ...), dans la mesure où ces matériaux assurent une stabilité pérenne du site en surface (notamment vis-à-vis des caractéristiques mécaniques) sans compromettre la protection du milieu naturel.

Rappelons enfin que jusqu'ici, les opérations de comblement de cavités abandonnées par des coulis à base de déchets issus de processus industriel sont restées ponctuelles et très surveillées en France. Elles n'ont pas été renouvelées de manière systématique et industriellement à des grandes superficies de carrières.

Deux remarques peuvent être formulées à ce titre sur ce type de chantier :

- d'une part, l'évaluation technique des risques doit être réalisée de façon posée pour des sites et des produits bien identifiés. Elle participe donc plutôt à une démarche de prévention planifiée applicable à des zones données, et ne doit pas être transposée de façon inconsidérée sur des opérations urgentes de mise en sécurité ;
- d'autre part, il n'y a pas, excepté dans les régions où il existe un service spécialisé (Service des Carrières), de procédures d'archivage pour les dossiers techniques

relatifs aux opérations de comblement. Dans le cas d'utilisation de sous-produits industriels, et même si la traçabilité des filières de réutilisation des déchets est actuellement contrôlable par l'administration (DRIRE), il conviendrait que de telles opérations, notamment si elles se déroulent sous domaine privé, soient répertoriées et conservées.

6. Références Bibliographiques

- Etude de la faisabilité du remblayage d'une carrière souterraine par un coulis à base de Bauxaline® et de cendres volantes LFC/Gardanex® - Janvier 2005 - *Rapport INERIS-DRC-05-47375/DESP-R01a*.
- Plot de remblayage d'une carrière souterraine par un coulis à base de Bauxaline®- Caractérisations hydrogéologique et géotechnique du site à l'état initial – *Rapport INERIS DRS- 04-56407* – février 2004.
- Evaluation des matériaux de comblement pour les carrières souterraines de craie dans le Nord Pas-de-Calais - Approche géochimique - *rapport BRGM 40934* - Décembre 1999.
- Valorisation de mâchefers stabilisés pour le confortement de carrières souterraines – Etude du comportement à long terme; *Stab & Env 99* (congrès) – actes Bouchelaghem, Magnie (Inertec), Gobbey (Ademe).
- DOMAS J., PEPIN G. 2002. Evolution des paramètres physiques et mécaniques d'un déchet stabilisé soumis au vieillissement –,- *Déchets, Sciences et Techniques*, n°28 4^{ème} trimestre, pp 44 à 48.
- Evaluation des méthodes et du coût de la mise en sécurité des populations menacées par les risques d'effondrement de carrières ; *rapport INERIS SSE-24EA03* - juillet 1995.
- Guide Technique relatif aux installations de stockage de déchets inertes issus du BTP – Edition juin 2004; *MEDD, direction de la prévention des pollutions et des risques*.
- Arrêté du 31 décembre 2004 relatif aux installations de stockage de déchets industriels inertes provenant d'installations classées, *MEDD, DPPR*.
- Méthodologie d'évaluation du comportement à la lixiviation d'un déchet dans des conditions spécifiées - *Norme AFNOR ENV 12920*.
- Recycled materials in European Highway Environments. *Federal Highway Administration*. Octobre 2000.
- Evaluation of the stability of sanitary Landfills; Singh and Murphy ; *Issues in the Geotechnics of mining wastes and tailings*; Blight, Toncoso, Fourie, Wolski.
- Recyclage ; Mines et carrières Industrie Minérale - Novembre 1998.
- Elimination, traitement et valorisation des déchets - Axes de recherches possibles dans le cadre des études et recherches des laboratoires des ponts et chaussées ; *Rapport LCPC* – Avril 1994.