



Guide méthodologique de comblement de cavités à l'aide de matériaux alternatifs

Rapport final

BRGM/RP-66500-FR

Décembre 2016



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Guide méthodologique de comblement de cavités à l'aide de matériaux alternatifs

Rapport final

BRGM/RP-66500-FR

Décembre 2016

Étude réalisée dans le cadre des opérations
de Service public du BRGM

S. Coussy, R. Albinet, I. Djouad, P. Bâlon

<p>Vérificateur : Nom : Emilie Vanoudheusden Date : 25/01/2017 Signature :</p> 
--

<p>Approbateur : Nom : Hubert Léprond Fonction : Responsable de l'unité Sites, Sols et Sédiments Pollués Date : 01/02/2017 Signature :</p> 

Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Mots-clés : Cavités, Déchets, Remblaiement

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

S. Coussy, R. Albinet, I. Djouad, P. Bâlon. (2017) - Guide méthodologique de comblement de cavités à l'aide de matériaux alternatifs. Rapport final. BRGM/RP-66500-FR, 22 p., 2 fig., 5 tabl.

© BRGM, 2017, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le présent document est un guide qui fournit des **éléments méthodologiques pour la valorisation de matériaux alternatifs en comblement de cavités d'un point de vue environnemental**. Dans ce cadre, une réflexion a été menée en comité d'experts pour proposer des éléments techniques dans le but d'évaluer les impacts environnementaux des matériaux utilisés en comblement de cavités. Ce comité, organisé par le MTES, regroupe des experts des organismes suivants : BRGM, CEREMA, IFSTTAR, INERIS.

La méthodologie retenue constitue une démarche progressive qui permet, à partir d'une caractérisation des matériaux alternatifs destinés à mettre en sécurité une cavité, de savoir si ces matériaux auront un impact environnemental au niveau de la cavité et dans son environnement proche.

Le document présente en détail la méthodologie, précise les matériaux qui sont acceptés dans la démarche, et spécifie les méthodes de caractérisation environnementales à appliquer.

Sommaire

1. Contexte	7
1.1. OBJECTIF DU GUIDE	7
1.2. RAPPELS RÉGLEMENTAIRES.....	7
1.3. DÉFINITIONS	7
1.4. LEXIQUE	8
1.5. CHAMP D'APPLICATION	8
1.5.1. Généralités	8
1.5.2. Cavités concernées	9
1.5.3. Techniques de mise en sécurité des cavités souterraines.....	9
2. Méthodologie de comblement des cavités par des matériaux alternatifs	10
2.1. LES GRANDES ÉTAPES DE LA MÉTHODOLOGIE.....	10
2.2. ÉTAPE 1 : CHOIX DU MATÉRIAU.....	12
2.3. ÉTAPE 2 : VÉRIFICATION DE LA QUALITÉ CHIMIQUE DU MATÉRIAU ALTERNATIF	12
2.3.1. Modalités d'échantillonnage et d'analyse du matériau alternatif	13
2.3.2. Vérification du respect de Valeurs Limites pour les polluants organiques	15
2.3.3. Valeurs d'utilisation 1	16
2.4. ÉTAPE 3 : ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE ET CARACTÉRISATION DE LA VULNÉRABILITÉ DE LA NAPPE.....	18
2.4.1. Étude hydrogéologique	18
2.4.2. Étude de vulnérabilité	19
2.4.3. Valeurs d'utilisation 2	19
2.5. ÉTAPE 4 : COMPARAISON AVEC LE FOND GÉOCHIMIQUE LOCAL.....	20
2.5.1. Détermination du fond géochimique local	20
2.5.2. Comparaison des résultats	22

Liste des figures

Figure 1 : Organigramme méthodologique de la démarche de valorisation des matériaux alternatifs en comblement de cavités.....	11
Figure 2 : Exemple de plan d'échantillonnage du fond géochimique local de la cavité	21

Liste des tableaux

Tableau 1. Protocoles d'analyse chimique en fonction des paramètres analysés.....	14
Tableau 2. Valeur Limites à respecter pour les polluants organiques	15
Tableau 3. Liste des valeurs d'utilisation 1 (VU1)	17
Tableau 4. Liste des valeurs d'utilisation 2 (VU2)	20
Tableau 5. Liste des paramètres à comparer au fond géochimique local de la cavité	22

1. Contexte

1.1. OBJECTIF DU GUIDE

L'objectif de ce guide est de proposer **une démarche d'acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en comblement de cavités**. Dans ce cadre, une réflexion a été menée en comités d'experts¹ pour fournir des éléments techniques dans le but d'évaluer les impacts environnementaux des matériaux utilisés en comblement de cavités.

1.2. RAPPELS RÉGLEMENTAIRES

Selon la réglementation européenne relative aux déchets, il est considéré qu'un déchet inerte n'a pas d'impact sur les eaux souterraines pour les paramètres considérés s'il respecte les critères définis dans l'Arrêté du 12/12/14 (transposant la décision n°2003/33/CE définissant les seuils d'acceptation en ISDI). Le but du présent guide est d'être plus spécifique en proposant une méthodologie dédiée à la valorisation de matériaux alternatifs en comblement de cavités.

1.3. DÉFINITIONS

- **Matériau alternatif** : tout matériau composé à partir de déchets (à l'exclusion de ceux listés dans le § 2.2) utilisé dans le cadre du remplissage de vides du sous-sol en vue de reconstituer les caractéristiques mécaniques compatibles avec l'usage en surface. Ce matériau alternatif peut être constitué de déchets seuls ou en mélange avec d'autres matériaux (alternatifs ou non) et peut avoir subi ou non un traitement préalable à sa valorisation en tant que matériau de comblement final.
- **Terre excavée** : Au sens de cette démarche : sol excavé qui peut comporter des remblais hétérogènes apportés au fil des ans.
- **Producteur** : Personne physique ou morale à laquelle incombent les responsabilités de gestion des matériaux alternatifs au titre de la législation sur les déchets, incluant la responsabilité relative à la qualité des matériaux fournis à un receveur. Selon la nature des travaux et le périmètre au sein duquel ont lieu des travaux d'excavation, il peut être : exploitant d'une installation classée ou maître d'ouvrage.
- **Concentration de fond** : concentration d'une substance, caractéristique d'un type de sol dans une zone ou région donnée, due à la fois aux sources naturelles et aux sources diffuses non naturelles telles que les dépôts atmosphériques.
- **Substance** : Tout élément chimique ou composé chimique.

¹ Ce comité, organisé par le MTES, regroupe les experts suivants : P. Bâlon, S. Coussy, I. Djouad, E. Vanoudheusden, R. Albinet (BRGM), V. Berche, C. Kreziak, C. Lefebvre, M. Perrot, E. Trielli (CEREMA), JS. Guedon (IFSTTAR), R. Revalor, JM. Watelet (INERIS). Les réunions du comité ont eu lieu en 2015, les 08/07, 23/10 et 16/12, en 2016, les 08/03, 10/05 et 19/09 et le 13/03/2017.

1.4. LEXIQUE

COHV	Composés Organo-Halogénés Volatils
HAP	Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques
HCT	Hydrocarbures Totaux
PCB	Polychlorobiphényles

1.5. CHAMP D'APPLICATION

1.5.1. Généralités

Tout matériau alternatif qui sera utilisé comme matériau de comblement est considéré comme un déchet. Ainsi, un suivi de sa traçabilité est nécessaire.

Il convient de noter par ailleurs que la démarche et les caractérisations chimiques évoquées dans ce guide concernent **le matériau final** qui sera mis en œuvre dans la cavité concernée. Si un essai de lixiviation est requis, celui-ci sera donc réalisé sur le matériau final. Si celui-ci se trouve sous forme monolithique (ex. coulis), il sera broyé pour réaliser l'essai de lixiviation.

L'objectif de cette démarche n'est pas de créer des installations de stockage des déchets, mais d'utiliser le potentiel de résistance mécanique des matériaux alternatifs pour mettre en sécurité les cavités. **Ainsi, ce guide exclu d'emblée :**

- les opérations de remblayage de déchets dans les cavités à des fins de stockage,
- tout matériau ne justifiant pas d'une fonction géotechnique, à court ou long terme au sein du matériau alternatif mis en œuvre pour le comblement de cavités,
- tout matériau alternatif dont les phases d'élaboration ne seraient pas justifiées par l'atteinte de performances géotechniques.

Il est rappelé qu'il est strictement interdit de mélanger les déchets avec d'autres constituants dans le but de diluer la pollution.

À titre d'exemples, les matériaux suivants peuvent être envisagés en comblement de cavités :

- cendres volantes mises en œuvre dans un béton² neutralisant leurs propriétés irritantes,
- scories,
- mâchefers,
- déchets du bâtiment et de démolition,
- terres excavées.

² Les NF EN 450-1 et 450-2 spécifient l'évaluation de la conformité des cendres volantes pour le béton.

1.5.2. Cavités concernées

Les cavités peuvent être d'origine anthropique (exploitations de ressources minérales, puits, sapes, infrastructures souterraines, etc.), ou naturelle (cavités de dissolution, de suffosion ou volcanique).

Les réseaux karstiques actifs, inactifs ou fossiles sont exclus du champ d'application du guide en raison d'un niveau de complexité (difficulté d'évaluation de l'infiltration importante, des écoulements et du risque de débordement) incompatible avec la présente méthodologie.

Afin d'éviter que l'apport de matériau dans une cavité puisse engendrer un effet de barrage, **les cavités ennoyables** seront également écartées de ce guide.

Il est aussi rappelé, d'un point de vue environnemental, que la [Directive Européenne Cadre sur l'Eau 2000/60/CE du 23/10/00](#) impose l'atteinte du bon état ou, à défaut, la non-dégradation des masses d'eau. Aussi, afin de respecter cet objectif, la méthodologie proposée (cf. l'étape 3 en § 2.4) permet de minimiser les risques de contamination des masses d'eau souterraine et des eaux de surface par la prise en compte de l'infiltration des eaux météoriques au droit du site et d'éventuels usages sensibles de la nappe, en cohérence avec l'approche du Système d'Evaluation de la Qualité de l'eau (SEQ eau).

1.5.3. Techniques de mise en sécurité des cavités souterraines

Il existe plusieurs possibilités techniques de consolidation des cavités souterraines, dont, par exemple :

- remblaiement (comblement gravitaire) total ou partiel ;
- injection par forages ;
- construction de piliers en maçonnerie ;
- comblement par mousse dure.

Les matériaux alternatifs peuvent être utilisés dans le cadre des deux premières techniques mentionnées :

- remblaiement (comblement gravitaire) : technique qui consiste en la suppression de l'essentiel du vide souterrain par la mise en place de matériaux sans liants hydrauliques ;
- injection par forage : cette technique de consolidation met en œuvre des matériaux tels que des sablons ou des cendres volantes traitées au ciment. Cependant, les caractéristiques intrinsèques de certains matériaux alternatifs (concentration en sulfates, pH du matériau, ...) peuvent altérer significativement la qualité du coulis et, *in fine*, la stabilité mécanique finale. Il est donc recommandé d'effectuer les analyses chimiques et géotechniques nécessaires afin de vérifier la compatibilité des matériaux avec la technique employée préalablement à la présente démarche.

Concernant le détail des techniques de comblement des cavités, il est conseillé de se reporter au rapport d'études INERIS DRS-15-149564-02401A « Guide appliqué sur les solutions de mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique ».

2. Méthodologie de comblement des cavités par des matériaux alternatifs

Ce guide propose un déroulement méthodologique des solutions techniques à déployer pour évaluer au mieux l'impact environnemental des matériaux alternatifs utilisés en comblement de cavités.

terme, il sera intéressant de comparer le contenu de ce guide à des réalisations de remblayage de cavités ayant développé d'autres démarches d'évaluation environnementale de l'impact des matériaux mis en œuvre. Cela permettrait d'apprécier l'applicabilité de la méthodologie ici proposée en la confrontant aux pratiques effectives de projets qui ont pu mettre en œuvre des matériaux non conventionnels pour la mise en sécurité de cavités.

2.1. LES GRANDES ÉTAPES DE LA MÉTHODOLOGIE

La méthodologie est divisée en 4 étapes principales à réaliser successivement (comme l'organigramme en Figure 1 le représente, les étapes 3 et 4 ne sont requises que si l'étape précédente n'est pas concluante) :

- étape 1 : choix du matériau ;
- étape 2 : vérification de la compatibilité chimique du matériau ;
- étape 3 : étude hydrogéologique et caractérisation de la vulnérabilité de la nappe ;
- étape 4 : caractérisation du fond géochimique local en cas d'une infiltration et/ou d'un usage avéré de la nappe.

À l'issue des étapes 2, 3 et 4, deux possibilités se présentent :

- soit le matériau est déclaré valorisable pour le comblement de la cavité à remblayer,
- soit le matériau ne peut être valorisé pour le comblement de la cavité sans éléments d'études complémentaires portant sur les matériaux, l'hydrogéologie etc. (se référer § 3 du rapport [BRGM/RP-64257-FR de Décembre 2014 : Qualité environnementale des matériaux en comblement des cavités \(phase 2\)](#)).

Le choix d'un matériau, de son élaboration et de sa mise en œuvre est une succession d'étapes primordiales pour le comblement de cavités incombant au maître d'ouvrage. Elles ne seront pas décrites dans le présent guide, celui-ci étant consacré à l'évaluation **environnementale** des matériaux alternatif envisagés pour le comblement de cavités.

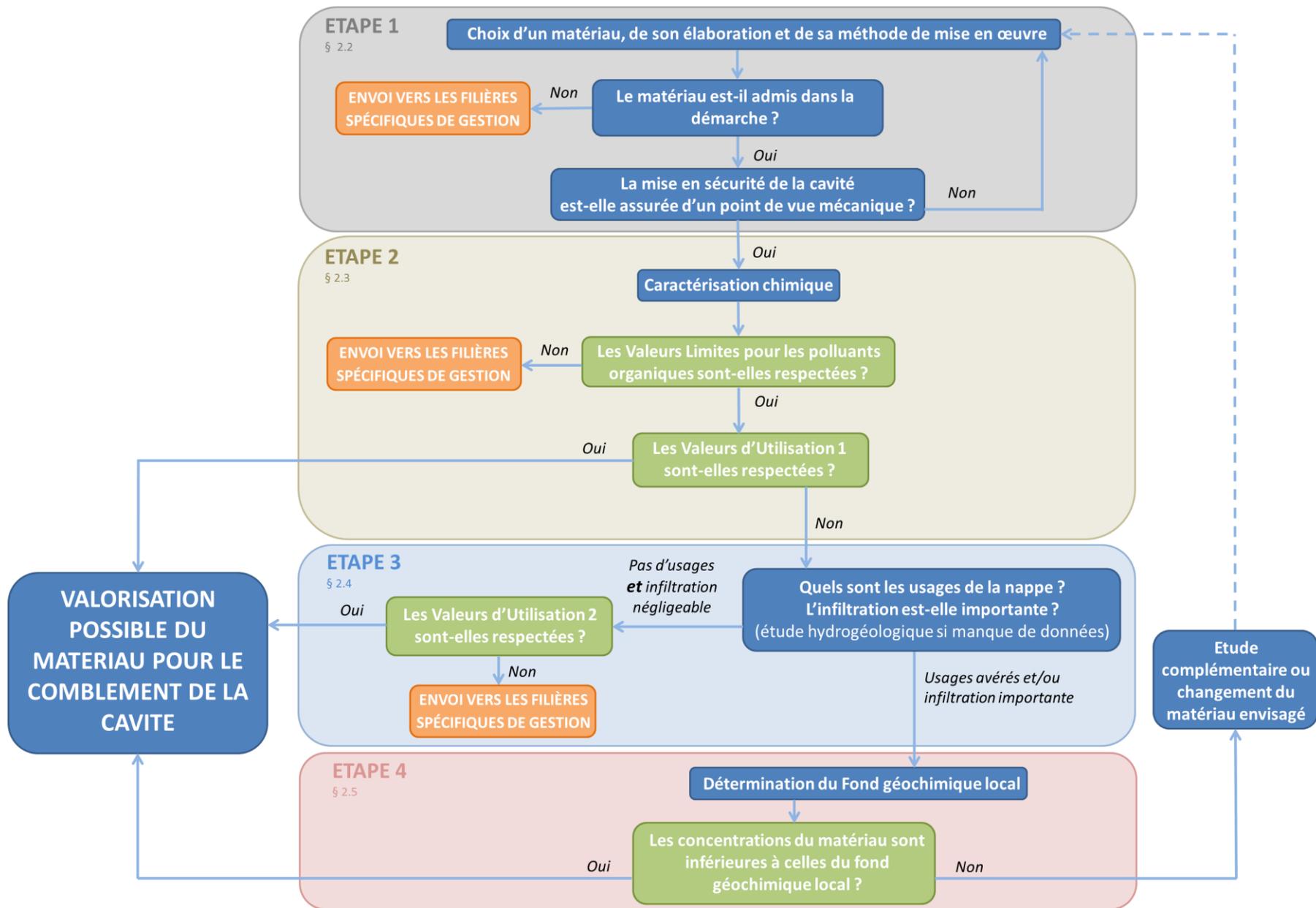


Figure 1. Organigramme méthodologique de la démarche de valorisation des matériaux alternatifs en comblement de cavités.

2.2. ÉTAPE 1 : CHOIX DU MATÉRIAU

Les matériaux alternatifs sélectionnés pour combler les cavités doivent répondre à des exigences de **mise en sécurité mécanique** de ces cavités. Le choix des matériaux et de la méthode de mise en œuvre sera effectué en ce sens. Tous les matériaux alternatifs à l'exclusion des déchets listés ci-après peuvent être considérés comme potentiellement valorisables en comblement de cavités.

Les déchets suivants sont **exclus** du champ d'application du guide :

- les déchets dangereux au sens de l'article R.541-8 du Code de l'Environnement ;
- les déchets radiologiquement marqués³ ;
- les déchets amiantifères ou contaminés par de l'amiante.

Les matériaux qui sont d'emblée exclus de la démarche doivent être envoyés vers des filières spécifiques de gestion.

Par ailleurs, seuls les matériaux alternatifs qui présentent une **teneur en matière organique (COT) < 3 %** sont admis dans la démarche. Ce paramètre sera mesuré selon les dispositions de la norme NF EN 13137 (Caractérisation des déchets - Dosage du carbone organique total dans les déchets, boues et sédiments) ou équivalent.

De même, le pH du matériau alternatif doit être compris entre 6,5 et 10,5. Ce paramètre sera mesuré selon les dispositions de la norme NF EN 16192 après lixiviation du matériau par la mise en œuvre de la norme ENV 12457-2 (lixiviation des déchets fragmentés) ou équivalent.

Tout autre matériau admis dans la démarche devra subir des tests mécaniques afin de vérifier si celui-ci remplira les objectifs de mise en sécurité à court et long terme dans le cadre de son utilisation pour la consolidation de la cavité. Les modalités de cette vérification sont décrites de manière exhaustive dans les [notices techniques IGC](#) et dans le rapport INERIS DRS-15-149564-02401A « Guide appliqué sur les solutions de mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique ».

2.3. ÉTAPE 2 : VÉRIFICATION DE LA QUALITÉ CHIMIQUE DU MATÉRIAU ALTERNATIF

Cette étape de caractérisation chimique s'applique pour les matériaux alternatifs qui ont des propriétés mécaniques permettant la mise en sécurité de la cavité.

La vérification de la qualité chimique du matériau alternatif final avant sa valorisation devra être effectuée dans des conditions d'échantillonnage conformes aux normes et guides en vigueur (selon le matériau envisagé) et suivant la liste d'analyses proposée en § 2.3.1.

Les résultats obtenus pour ces paramètres chimiques seront comparés aux valeurs limites pour les polluants organiques listées dans le Tableau 2 et aux valeurs d'utilisation 1 (VU1) listées dans le Tableau 3.

³ Toute pièce ou matériel issus de tout ou partie de locaux dans lesquels sont mis en œuvre des matières radioactives sous la forme de sources non-scellées.

NB : Le producteur du matériau alternatif est responsable de la caractérisation chimique de son matériau. Cette caractérisation devra notamment être réalisée en prenant en compte le passif et l'origine des déchets mis en œuvre. Ainsi, en cas de suspicion de pollution, des analyses spécifiques devront être réalisées pour les polluants envisagés.

2.3.1. Modalités d'échantillonnage et d'analyse du matériau alternatif

Pour ce qui est de l'échantillonnage des matériaux alternatifs, l'utilisateur se réfèrera aux préconisations des normes décrites dans le « guide de caractérisation des terres excavées dans le cadre de leur réutilisation hors site en technique routière et dans des projets d'aménagement », à savoir : ISO 10381 (notamment les parties 1, 2 et 5). Selon le type de matériaux envisagés en comblement de cavité, les différents volets du fascicule de documentation FD CEN/TR 15310 (2006) relative aux prélèvements de déchets pour leur caractérisation pourront être mis en œuvre pour l'échantillonnage.

Les analyses chimiques porteront sur :

- le pH ;
- certaines substances inorganiques ;
- certaines substances organiques ;
- certains sels solubles.

La vérification environnementale est effectuée, selon les paramètres, *via* la réalisation d'analyses sur brut (contenu total) ou après lixiviation (sur éluât pour Cr(VI), Cl⁻, SO₄²⁻, pH).

Le Tableau 1 ci-dessous présente les normes analytiques appliquées à chaque substance ou famille de substances. Les coûts de ces analyses sont variables en fonction des laboratoires et dépendent des méthodes analytiques employées. A titre indicatif, des fourchettes de prix sont données dans le Tableau 1 pour certaines méthodes. Ces coûts n'incluent pas les frais de gestion des échantillons.

⁴ Rapport de 2013 BRGM/RP-62856-FR disponible en ligne : infoterre.brgm.fr/rapports/RP-62856-FR.pdf

Substances analysées	Protocole d'essai	Gamme de prix (€HT par échantillon)	Remarques
Coupes C10-C40 des Hydrocarbures totaux (HCT C10-C40)	NF EN ISO 16703	20 - 50	Echantillon préalablement séché conformément aux dispositions de la norme NF EN 16179 (selon la volatilité des substances à déterminer)
Hydrocarbures volatils (HCT C5-C10)	PR NF EN ISO 16558-1		
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) hors naphthalène	XP CEN/TS 16181 ou NF ISO 18287 ou NF ISO 13877	30 - 60	
Hydrocarbures aromatiques, hydrocarbures halogénés volatils et naphthalène	NF EN ISO 22155	30 – 100	
Polychlorobiphényles (PCB)	XP CEN/TS 16190	30 – 150 (selon le nombre de congénères inclus)	
Dioxines et furannes		300 - 400	
Eléments traces métalliques (ETM) hors chrome VI	NF EN ISO 17294-2 / ISO 11885	50 – 100 (selon le nombre d'ETM analysés)	Une digestion à l'eau régale conforme à la norme NF EN 16174 devra être réalisée au préalable
Chlorures, sulfates et chrome VI	NF EN 16192		Analyse sur éluât obtenu par la mise en œuvre de la norme ENV 12457-2 (lixiviation des déchets fragmentés)

Tableau 1. Protocoles d'analyse chimique en fonction des paramètres analysés.

Comme indiqué dans le Tableau 2, le Tableau 3, le Tableau 4 et le Tableau 5 ci-après, certaines substances seront à analyser systématiquement dans ces matériaux, et d'autres seront à analyser uniquement en cas de suspicion de pollution par ces substances, en fonction du passif et de l'origine des matériaux.

2.3.2. Vérification du respect de Valeurs Limites pour les polluants organiques

Seuls seront admis dans cette étape 2 les matériaux alternatifs dépourvus de polluants organiques. **Ainsi, il conviendra de vérifier a minima que les paramètres listés dans le Tableau 2** Erreur ! Source du renvoi introuvable. **ci-dessous sont strictement inférieurs aux valeurs limites indiquées.** Cette restriction a pour but d'empêcher de remblayer les cavités avec des matériaux affectés par des pollutions organiques.

Mode de détermination des valeurs d'utilisation 1 (VU1)

Les valeurs d'utilisation 1 (VU1) ont été sélectionnées de la manière suivante :

- pour les composés organiques persistants (HAP, HCT C₁₀-C₄₀, PCDD/F, PCB), des valeurs ont été choisies à partir de bases de données régionales représentatives⁵ ;
- pour les autres composés (HCT C₅-C₁₀, BTEX et COHV), les valeurs ont été arrêtées en fonction de leur toxicité⁶ et des limites de quantification des techniques analytiques pour ces substances.

Paramètre	Analyse systématique	Valeurs Limites pour les polluants organiques (mg/kg MS)
PCB (somme des 7 congénères : 28, 52, 101, 118, 138, 153 et 180)	Oui	0,2
Dioxines/furannes (PCDD/PCDF)	Non	2.10 ⁻⁶ TEQ OMS 1998 (nd=LQ) et hors contribution PCB-dl
Somme des 16 HAP (US EPA) dont Naphtalène	Oui	10 0,1
HCT C10-C40	Oui	50
HCT C5-C10	Oui	40
BTEX dont Benzène	Oui	1,5 0,05
Tétrachloroéthylène (PCE)	Oui	0,2
Trichloroéthylène (TCE)	Oui	0,1
Cis-Dichloroéthylène	Oui	0,1
Chlorure de vinyle	Oui	0,1

Tableau 2. Valeur Limites à respecter pour les polluants organiques.

À l'issue de cette vérification, les matériaux pourront soit :

- être gérés en filières spécifiques de gestion s'il y a dépassement des valeurs limites pour au moins un composé organique,
- être caractérisés vis-à-vis du pH, de la teneur en composés inorganiques et en Carbone Organique Total (COT) selon les dispositions décrites en § 2.3.3 ci-après.

⁵ Groupe de travail ministériel sur la réutilisation hors site des terres excavées.

⁶ Groupe de travail ministériel sur la réutilisation hors site des terres excavées.

2.3.3. Valeurs d'utilisation 1

Les valeurs d'utilisation 1 sont les concentrations en certains éléments traces métalliques (ETM) et sels solubles désignées pour l'acceptation du matériau en tant que remblai de comblement, quels que soient les usages de la nappe et l'infiltration au droit de la cavité.

Si les concentrations des substances présentes dans le matériau sont inférieures aux VU1 (Tableau 3), il est possible de valoriser ce matériau pour le comblement de la cavité. Si au moins une des valeurs de concentrations égale ou dépasse ces seuils VU1, il sera nécessaire de passer à l'étape 3.

Mode de détermination des valeurs d'utilisation 1 (VU1)

Les valeurs d'utilisation 1 (VU1) ont été sélectionnées de la manière suivante :

- *pour les éléments traces métalliques (ETM) et l'arsenic, les VU1 ont été fixées d'après la base de données ASPITET⁷ en prenant en compte les limites supérieures couramment observées dans les « **sols ordinaires** ». Cette liste a été validée par le MTES pour les terres excavées ;*
- *pour le baryum et l'antimoine, les VU1 ont été établies selon les résultats du programme FOREGS⁸ ;*
- *pour le molybdène, les VU1 ont été établies selon les résultats du programme RMQS⁹ ;*
- *pour les sels solubles (chlorures et sulfates), les VU1 ont été fixées par rapport aux critères définis dans l'annexe II de l'Arrêté du 12 décembre 2014 (relatif aux conditions d'admission des déchets inertes dans les installations relevant des rubriques 2515, 2516, 2517 et dans les installations de stockage de déchets inertes relevant de la rubrique 2760 de la nomenclature des installations classées) ;*
- *pour le Cr(VI), la valeur a été fixée en fonction d'une saisine de l'ANSES recommandant cette valeur limite dans les eaux (saisine n° 2011-SA-0127 - 2 juillet 2012).*

⁷ Annexe 1 de [Baize D, 2000, « Teneurs totales en métaux lourds dans les sols français, résultats généraux du programme ASPITET », Courier de l'environnement n°39.](#)

⁸ <http://weppi.gtk.fi/publ/foregsatlas/>. Méthodologie décrite dans Salminen *et al.*, 2005, « FOREGS Geochemical Atlas of Europe, Part 1: Background Information, Methodology and Maps », Espoo: Geological Survey of Finland.

⁹ <https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmqs-34>. InfoSol, US 1106 (2011). Réseau de mesures de la qualité des sols (RMQS), programme du Groupement d'Intérêt Scientifique Sol (GIS Sol), rapport technique final, avril 2011.

Paramètre	Analyse systématique	VU1 (mg/kg MS si unité non précisée)	Remarque
As	Oui	25	
Ba	Non	100	
Cd	Oui	0,4	
Cr total	Oui	90	
Cr VI	Non	6 µg/L	analyse sur éluât selon le test de lixiviation NF EN 12457-2
Co	Non	20	
Cu	Oui	40	
Hg	Oui	0,1	
Mo	Non	1,5	
Ni	Oui	60	
Pb	Oui	50	
Sb	Non	1	
Se	Non	0,7	
Zn	Oui	150	
Chlorures	Oui	800	analyse sur éluât selon le test de lixiviation NF EN 12457-2
Sulfates	Oui	1 000	analyse sur éluât selon le test de lixiviation NF EN 12457-2

Tableau 3. Liste des valeurs d'utilisation 1 (VU1).

2.4. ÉTAPE 3 : ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE ET CARACTÉRISATION DE LA VULNÉRABILITÉ DE LA NAPPE

L'étape 3 consiste à évaluer l'infiltration des eaux météoriques au droit du site et à vérifier l'absence ou la présence d'usages sensibles de la nappe afin d'anticiper tout risque pour la santé humaine et l'environnement en cas de comblement de la cavité avec des matériaux alternatifs.

Pour cela, il est nécessaire d'effectuer une étude hydrogéologique et une étude de vulnérabilité, à partir de données d'études antérieures. Si ces données s'avèrent peu nombreuses voire manquantes, l'étude sera accompagnée par une campagne de terrain, pour collecter les données manquantes.

À l'issue de cette étape, s'il est démontré qu'il n'y a pas d'usages constatés de la nappe et que l'infiltration est négligeable (sur jugement d'expert), alors le comblement de la cavité sera possible, à condition que les substances analysées lors de l'étape 2 dans le matériau alternatif présentent des teneurs inférieures aux valeurs d'utilisation 2 (VU2) listées dans le Tableau 4. Dans le cas contraire, le matériau alternatif sera envoyé vers une filière spécifique de gestion.

2.4.1. Étude hydrogéologique

L'étude hydrogéologique comportera :

- une caractérisation du contexte géologique et hydrogéologique local,
- une étude de la perméabilité et de transmissivité des formations géologiques concernées (matériau et encaissant concernés),
- une étude de la piézométrie, de la profondeur, du sens d'écoulement des nappes et des débits rencontrés. La profondeur de la nappe permettra notamment d'évaluer l'envolement de la cavité,
- une identification des problèmes potentiels et des impacts possibles liés au comblement de la cavité (modification des écoulements et effet barrage, etc.),
- une caractérisation de la qualité des eaux souterraines si elle n'est pas connue.

Cette étude permet de réaliser une carte piézométrique et une coupe hydrogéologique de la nappe, pour expliciter le régime des eaux souterraines.

La perméabilité du matériau encaissant doit être connue, afin d'estimer au mieux l'infiltration réelle des lixiviats issus des matériaux de comblement.

En outre, cette étude hydrogéologique doit permettre principalement l'identification des problèmes potentiels liés au comblement de la cavité par le matériau alternatif (modification des écoulements, effets barrages...).

NB : Il est rappelé que cette démarche n'est pas adaptée à une situation d'urgence, puisqu'une étude hydrogéologique complète requiert la collecte des données sur au moins une période de basses eaux et une période de hautes eaux, à moins que le sens d'écoulement et la piézométrie soient déjà convenablement décrits et que la documentation soit suffisamment importante.

2.4.2. Etude de vulnérabilité

Les paramètres qui doivent *a minima* être étudiés dans l'étude de vulnérabilité sont :

- **l'enneigement** : vérification à l'aide des données [BSS-Eau](#), [Système d'Information sur l'Eau](#) correspondant au bassin versant où se situe la cavité et autres documents disponibles, ou par une campagne de terrain si les informations sont insuffisantes ;
- les **usages de la nappe** : vérification à l'aide des données [ADES](#) et [BSS-Eau](#) et autres documents disponibles, ou par une campagne de terrain si les informations sont insuffisantes. Les usages de la nappe sont définis « sensibles » principalement pour :
 - o les puits ou captages d'eau potable destinés à la consommation humaine, aux élevages ou à l'irrigation des cultures,
 - o les eaux destinées à des activités piscicoles,
 - o les eaux utilisées à usage de baignade.

Par ailleurs, si la cavité est localisée dans une zone urbanisée ou à dominante résidentielle, une enquête de voisinage devra être réalisée auprès de la population riveraine, afin de vérifier l'absence ou la présence de puits particuliers non déclarés et ainsi la sensibilité des usages de la nappe.

Les usages jugés comme n'ayant pas d'influence directe ou indirecte sur la santé des populations (ex : industriel, commercial, militaire) sont définis comme « non-sensibles » ;

- **l'infiltration** : son importance sera tributaire de nombreux paramètres, comme le contexte géologique, la perméabilité de l'encaissant, la présence de nappes sus-jacentes. Le potentiel d'infiltration sera **évalué essentiellement sur jugement d'expert**.

2.4.3. Valeurs d'utilisation 2

S'il est démontré qu'il n'y a pas d'usages constatés de la nappe et que l'infiltration est négligeable (cf. § 2.4.1 et 2.4.2), alors le comblement de la cavité sera possible, à condition que les substances analysées lors de l'étape 2 dans le matériau alternatif respectent les valeurs limites pour les polluants organiques listées dans le Tableau 2 et les valeurs d'utilisation 2 (VU2) listées dans le Tableau 4. **Si au moins une des valeurs est égale ou dépassée, le matériau alternatif ne peut être utilisé pour le comblement d'une cavité et doit être dirigé vers des filières spécifiques de gestion.**

Pour les situations plus sensibles où une infiltration non négligeable et/ou des usages sont constatés pour la nappe, il sera nécessaire de vérifier que le matériau alternatif ne sera pas une source de contamination par comparaison avec les matériaux naturels de la cavité. Cela se réalise au cours d'une 4^e étape portant sur le fond géochimique local présentée en § 2.5.

Mode de détermination des valeurs d'utilisation 2 (VU2)

- *Pour les éléments traces métalliques (ETM) et l'arsenic, les VU2 ont été fixées d'après la base de données ASPITET¹⁰ en prenant en compte les limites hautes de la gamme de valeurs couramment observé dans les sols en cas d'**anomalies naturelles modérées**.*
- *Pour les sels solubles, aucune valeur n'est fixée dans les VU2 car on considère que les matériaux alternatifs seront isolés de tout phénomène de lixiviation.*

¹⁰[Baize D, 2000, « Teneurs totales en métaux lourds dans les sols français, résultats généraux du programme ASPITET », Courrier de l'environnement n°39](#)

Paramètre	Analyse systématique	VU 2 (mg/kg MS)
As	Oui	60
Cd	Oui	2
Cr total	Oui	150
Co	Non	90
Cu	Oui	62
Hg	Oui	0,1
Ni	Oui	130
Pb	Oui	90
Se	Non	2
Zn	Oui	250

Tableau 4. Liste des valeurs d'utilisation 2 (VU2).

2.5. ÉTAPE 4 : COMPARAISON AVEC LE FOND GÉOCHIMIQUE LOCAL

Pour cette étape, il serait envisageable et économiquement judicieux de réutiliser des informations sur la qualité des matériaux en profondeur existantes par ailleurs. Cependant, faire appel à des bases de données de fond géochimique profond nécessite une mutualisation, bancarisation et vérification des teneurs en ETM amassées par divers acteurs et dans des objectifs différents. Ce processus est à ce jour insuffisamment développé mais il faut souligner que des travaux sont en cours sur ces aspects (pertinence, fiabilité, représentativité statistique des données, échelles de réflexion...). La présente méthodologie recommande donc d'établir au cas par cas le fond géochimique selon les dispositions décrites ci-après.

2.5.1. Détermination du fond géochimique local

Méthode de caractérisation du fond géochimique au niveau d'une cavité

La caractérisation du fond géochimique local au niveau d'une cavité doit être réalisée dans l'encaissant, au niveau des formations géologiques présentes à la même profondeur que la cavité étudiée, à proximité immédiate de cette cavité. Pour cela, il est nécessaire de définir une grille d'échantillonnage, ainsi que des procédures de réalisation des sondages et de prélèvement des échantillons, en gardant en mémoire qu'un nombre minimal de 20 échantillons est nécessaire pour garantir une bonne représentativité (dans ce qui est proposé ci-dessous, un minimum de 7 sondages différents, comportant chacun *a minima* 3 échantillons est recommandé).

Remarque : si la cavité est accessible, les inspections destinées à vérifier l'état de la cavité permettront en outre de pouvoir prélever des échantillons au niveau de la paroi. Cela permettra de s'affranchir du protocole d'échantillonnage préconisé ci-dessous.

Définition de la maille d'échantillonnage

Pour une cavité d'une superficie peu importante ($\leq 900 \text{ m}^2$), une grille de maille $30 \times 30 \text{ m}$, centrée au droit de la cavité sera mise en place (voir schéma ci-dessous). Pour une cavité de superficie supérieure, une grille de maille $100 \times 100 \text{ m}$, centrée au droit de la cavité, sera employée. Il est indispensable d'avoir *a minima* 7 sondages à réaliser, quelle que soit la géométrie rencontrée.

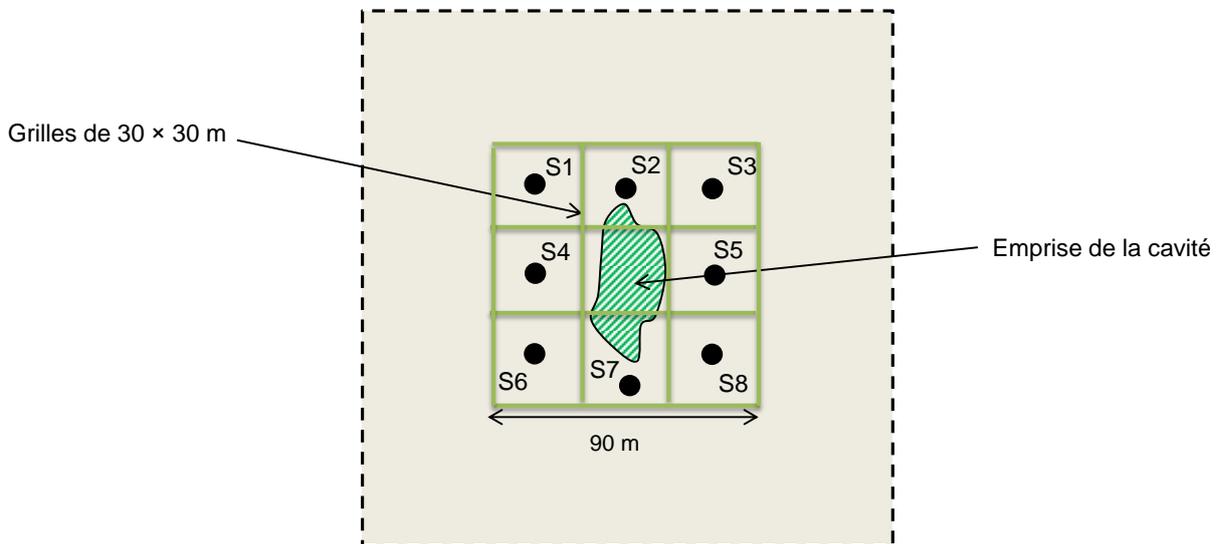


Figure 2. Exemple de plan d'échantillonnage du fond géochimique local de la cavité.

Modalités de réalisation des sondages et des échantillons

Les sondages sont réalisés, dans la mesure du possible, au centre de chaque maille et doivent atteindre *a minima* la profondeur maximale de la cavité concernée par l'étude. Il est nécessaire d'adapter la technique de forage en fonction de la lithologie et de la profondeur à atteindre. Dans ce cadre, sont proscrites toutes les techniques de forage qui injectent du lubrifiant et qui fausseraient les analyses sur les échantillons prélevés.

Au moins un échantillon unitaire par couche de lithologie similaire est prélevé dans un même sondage. Le début du prélèvement est réalisé au niveau de la cote maximale théorique de la cavité (toit). En cas de stratification fine ou complexe, un échantillon unitaire par mètre linéaire sondé est prélevé. Si la lithologie est globalement homogène sur l'ensemble de la hauteur d'une cavité, il est préconisé de prélever 2 à 3 échantillons par lithologie similaire afin d'obtenir un nombre représentatif d'échantillons.

Essais et analyses à réaliser

Les analyses à réaliser pour caractériser le fond géochimique local doivent être identiques à celles réalisées sur le matériau alternatif envisagé pour le comblement de ladite cavité. Il s'agira d'analyses en contenu total pour les éléments traces métalliques et d'analyses sur éluât pour les sels solubles (sulfates, chlorures). Le détail de ces substances est listé dans le Tableau 5.

Représentativité des échantillons et traitement statistique des données

En théorie, 30 échantillons unitaires sont nécessaires pour assurer une représentativité suffisante dans le cadre de l'établissement d'un bruit de fond en qualité du sol (norme NF EN ISO 19258 « Qualité du sol - Guides pour la détermination des valeurs de bruit de fond »).

Cependant, un guide allemand de détermination du fond géochimique au niveau des Länder préconise un minimum de 20 échantillons¹¹. Dans le cas de la détermination du fond géochimique au niveau d'une cavité, la zone d'investigations étant locale, le nombre minimal d'échantillons requis est donc fixé à 20.

Concernant le traitement statistique des données, il est proposé d'utiliser le 90^e percentile des valeurs de concentrations mesurées sur les échantillons.

2.5.2. Comparaison des résultats

Une fois les valeurs fond géochimique définies, celles-ci sont comparées aux concentrations initialement relevées sur le matériau étudié (Tableau 5). Il est toléré que le matériau alternatif présente **jusqu'à 4 teneurs comprises entre 100 et 150% du fond géochimique** pour ce qui est des composés naturellement existants dans l'environnement local. Au-delà (s'il y a dépassement du seuil de 150% du fond géochimique ou s'il y a plus de 4 composés en concentration supérieure au fond géochimique), le matériau alternatif ne peut pas être utilisé en comblement de cavité et il est nécessaire de reprendre l'étape 1 en termes de choix du matériau ou de sa mise en œuvre ou d'apporté des éléments complémentaires comme mentionné au § 2.1.

Paramètre	Analyse systématique	Type d'analyse
As	Oui	Sur brut (contenu total)
Cd	Oui	
Cr total	Oui	
Co	Non	
Cu	Oui	
Hg	Oui	
Mo	Non	
Ni	Oui	
Pb	Oui	
Se	Non	
Zn	Oui	
Chlorures	Oui	
Sulfates	Oui	

Tableau 5. Liste des paramètres à comparer au fond géochimique local de la cavité.

NB : il est nécessaire de distinguer le fond géochimique local naturel et les apports anthropiques. Il est généralement admis que ces perturbations en profondeur pour les composés inorganiques sont rares (Baize, 1997 - « Teneurs totales en éléments traces métalliques »), les roches mères étant presque toujours indemnes de ce genre de contamination du fait de la nature des composés inorganiques. En revanche, les cavités d'origine anthropique peuvent présenter des impacts en lien avec les techniques d'extraction et autres rémanents d'exploitation (lubrifiants, hydrocarbures ou restes d'explosifs de carriers, par exemple). On ne doit donc pas considérer ce genre de contamination organique comme partie intégrante du fond géochimique naturel lors de l'étape 4.

¹¹ Bund-Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz, Niveaux de fond en matières inorganiques et organiques dans les sols.



Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement et Ecotechnologies
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr