

# RECOURS AUX GÉOSYNTHÉTIQUES POUR LA RÉHABILITATION D'ANCIENS SITES MINIERES

## REHABILITATION OF CONTAMINATED FORMER MINING SITES WITH GEOSYNTHETIC SOLUTIONS

Véronique HOANG<sup>1</sup>, Anne Laure GUILLERMIN<sup>2</sup> et Mathilde TERNISIEN<sup>2</sup>

1 BRGM/DPSM UTAM Sud, Gardanne, France

2 ANTEAGROUP, Lyon/Lille, France

**RÉSUMÉ** - Dans le cadre d'un projet de réhabilitation d'anciens sites miniers, les travaux suivants ont été réalisés afin de limiter l'exposition des usagers aux stocks de résidus :

- couverture des stocks de résidus à l'aide de géosynthétiques (drainage, accroche-terre et géofilet biodégradable) afin de permettre la végétalisation des sites ;
- réhabilitation des jardins avec un complexe anti-contaminant et anti-fouisseur pour réduire les risques de remontée de matériaux pollués via les terriers creusés par d'éventuels fouisseurs ;
- réhabilitation d'espaces intérieurs (caves, granges, ateliers, etc.) pour lesquels un géocomposite au ciment a été envisagé car il allie résistance mécanique, épaisseur et facilité d'installation.

Mots clés : bassin minier, sols pollués, préservation des milieux, couverture, drainage

**ABSTRACT** - For a project which goal is to rehabilitate old mining sites, the following works have been done to limit the exposure of the inhabitants with these waste stocks:

- covering of mining wastes with geosynthetics (drain, 3D geogrid and geonet) helping their revegetation;
- gardens rehabilitation with a filtration and separation geotextile and a specific anti-burrower geosynthetic to avoid the reappearance of contaminated soil via animals burrows;
- inner spaces rehabilitation (basement, barn, workshop...) for which a cement geocomposite has been selected because its combines mechanical strength, thickness and ease of installation.

Keywords: mining sites, contaminated soils, preservation of natural environments, landfill cover, drainage

### 1. Introduction

L'ancien site minier objet du présent article est situé en France métropolitaine dans le Massif Central, et a fait l'objet d'une exploitation minière du plomb du 14<sup>ème</sup> au 19<sup>ème</sup> siècle.

De 2009 à 2012, le groupement d'intérêt public GEODERIS a mené pour le compte de l'État l'inventaire des déchets miniers issus de l'industrie extractive en application de l'article 20 de la directive européenne 2006/21/CE (inventaire dit « DDIE »). À ce jour, sur l'ensemble du territoire métropolitain, il a été mis en évidence 19 cas particuliers d'habitations installées sur des dépôts miniers dites « maison sur dépôt ». C'est le cas du site étudié ici. L'inventaire DDIE réalisé sur ce site a permis d'identifier plusieurs dépôts, dont certains sont caractérisés par la présence de résidences permanentes à leur surface.

Dans ce contexte, l'État a chargé le Département Prévention et Sécurité Minière (DPSM) du Bureau de Recherches Géologiques et minières (BRGM) d'étudier et de mener à bien la réhabilitation de deux sites voisins comprenant :

- site A : plusieurs dépendances d'une résidence permanente (2 caves, grange, atelier, garage, allées et abords proches), un jardin potager et un dépôt de résidus miniers ;
- site B : jardins (potager et ornement) d'une résidence à vocation permanente (mise en vente) et un dépôt de résidus miniers.

La problématique est la suppression du mode de transfert entre les sources de pollution (résidus miniers) et les enjeux cibles (populations présentes). Ceci nécessite des travaux de terrassement/remodelage, de gestion des eaux pluviales, de couvertures, de nettoyage pour les pièces intérieures (caves, atelier, grange) ainsi que de maçonnerie ou de petit génie civil (dalle béton, muret, garde-corps).

Au vu de la technicité du projet et de la problématique liée à la sécurité des enjeux pendant et après les travaux, le DPSM a lancé une consultation de bureaux d'études à l'issue de laquelle il a mandaté AnteaGroup pour la réalisation d'une mission de maîtrise d'œuvre (MOE). Cette mission comprend :

- la réalisation d'investigations préalables ;
- la conception du projet ;
- le suivi des travaux pour une durée estimée à 4 mois hors période de préparation.

Dans le cadre de ce projet, les géosynthétiques sont apparus à plusieurs reprises comme la meilleure solution technique à mettre en œuvre. La suite de cet article s'attache à présenter les utilisations retenues pour la réhabilitation des stocks de résidus miniers, des jardins et des caves.

## 2. Couverture des stocks de résidus miniers

### 2.1. Schéma conceptuel

Deux stocks de résidus (T1 : 1 500 m<sup>2</sup> et T2 : 2 000 m<sup>2</sup>) sont situés à proximité immédiate de deux habitations. Ils constituent la source principale de pollution pour les habitants et riverains mais aussi pour le milieu naturel situé en aval (ruisseau, zone humide, zone de pâture) via les voies de transfert suivantes (Figure 1) :

- les matériaux du dépôt T2, situé à proximité immédiate de la première habitation et en surplomb de la seconde habitation, sont transférés par ravinement et par envol vers l'habitation la plus proche et les pâtures environnantes, et par ravinement vers l'autre habitation. Par ailleurs, les eaux ruissellent et s'infiltrent probablement à travers ce dépôt jusqu'à l'habitation située en aval ;
- les matériaux du dépôt T1, situé à proximité de la seconde habitation et en aval du dépôt T2, sont entraînés par ravinement et par envol vers l'habitation la plus proche (envol principalement) et vers le milieu naturel en aval (ravinement rejoignant principalement le ruisseau).

Les travaux nécessaires au traitement de ces deux dépôts avaient pour objectif d'éviter l'infiltration des eaux, l'entraînement des matériaux par ravinement et l'envol de poussières contaminées.

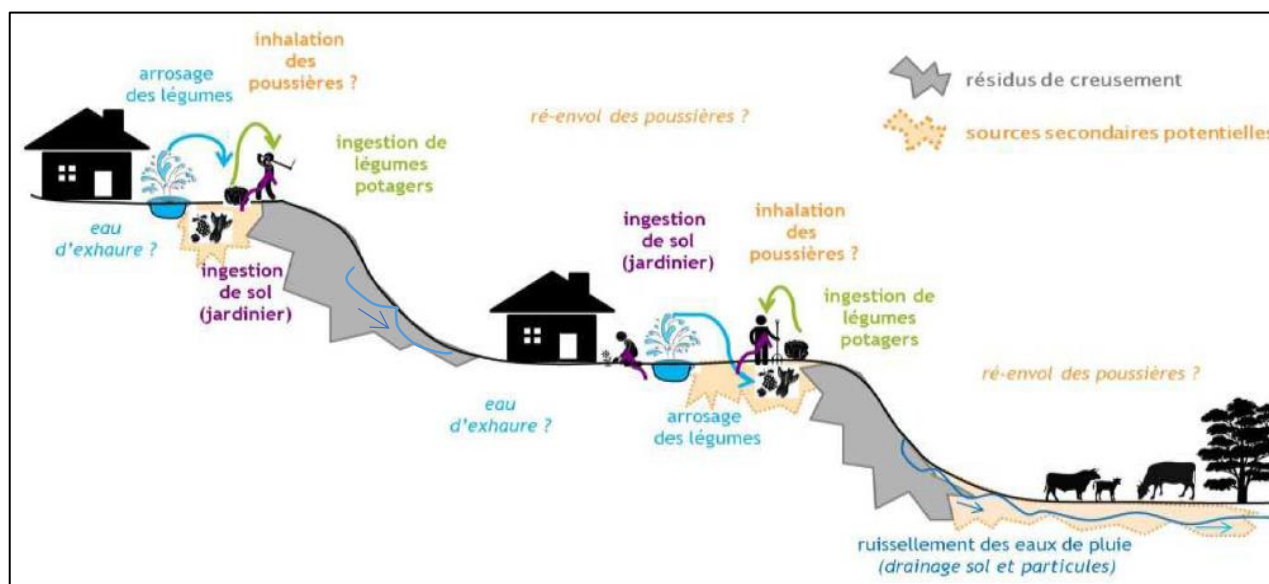


Figure 1. Schéma conceptuel associé au site et aux stocks de résidus (Source INERIS, 2015)

### 2.2. Projet de réhabilitation et barrière physique

Pour ces stocks, le projet a consisté en :

- un remodelage (déblais/remblais) des stocks (Figure 2) afin d'en améliorer la stabilité géotechnique à long terme et la gestion des eaux pluviales. Ce remodelage comprenait la modification des pentes et l'emprise des stocks, dans les limites physiques disponibles et en équilibrant les déblais/remblais afin de ne pas générer d'évacuation de matériaux ;

- la mise en œuvre d'un géocomposite de drainage afin de favoriser la stabilité du stock. Ce géocomposite est composé d'une feuille de PEHD embossée de mono-excroissances en pleine surface, associée à deux géotextiles non-tissés supérieur et inférieur (produit Teradrain© de chez TERAGEOS) ;
- la mise en œuvre d'une géogrille de renforcement accroche-terre afin de maintenir la couche de recouvrement ; cette géogrille joue également le rôle d'anti-fouisseur. Il s'agit d'une géogrille (GGR) tri-dimensionnelle, à mailles centimétriques ouvertes pour une bonne imbrication du matériau de couverture. Elle est recouverte d'une enduction polymérique. La géogrille 3D a une épaisseur de 10 mm et est produite à partir de fibres PET (polyester), le produit retenu est le Fortrac® 3D de chez HUESKER.
- la mise en œuvre d'une épaisseur de 30 cm de matériaux d'apport sains (contrôlés selon les préconisations du guide pour la valorisation des terres excavées<sup>1</sup>) de type terre végétale, support de végétalisation ;
- la mise en œuvre d'un géofilet en jute 100% biodégradable, afin d'éviter l'érosion de surface et de favoriser la tenue des graines en attendant la végétalisation. Ce géofilet, constitué à 100% de matériaux naturel (jute), a une durée de vie de 2 à 4 ans. Il présente un taux de perméabilité de 75% et une valeur minimale de résistance à la traction de 7,5 kN/m ;
- un ensemencement et la plantation sur les abords d'arbustes piquants et à feuillage persistant ;
- la création d'ouvrages de gestion des eaux pluviales (fossés) ;
- la mise en place d'une clôture type barrière pour ovidés/bovidés de 1,5 m de hauteur.

NOTA : ici, contrairement aux autres zones, la mise en place d'un filet avertisseur n'a pas été retenue, en raison de la perte des efforts de frottement que celui-ci induirait entre la géogrille accroche-terre et le matériau de recouvrement.

Certains ajustements ont été nécessaires pour prendre en compte les ouvrages périphériques et la topographie du site (busage d'un fossé, merlon de soutènement, plate-forme drainante).

### **2.3. Mise en œuvre sur des stocks en « dôme »**

Des réflexions spécifiques ont été menées de manière à trouver le meilleur plan de calepinage possible pour les stocks. En effet, les recommandations techniques classiques de pose de géosynthétiques indiquent que ceux-ci doivent être posés dans le sens de la pente. Or la géométrie en dôme des stocks (Fig. 2) rend difficile le respect de cette prescription.

Afin de rester dans la plage de résistance acceptable des produits retenus, il a été décidé d'étudier l'angle maximal admissible entre la pente du talus et l'axe de pose du géosynthétique. Cette approche est possible dans la mesure où la nature du produit posé était déjà connue à ce stade.

---

<sup>1</sup> Guide de valorisation hors site des terres excavées non issues de sites et sols pollués dans des projets d'aménagement - Ministère de la Transition écologique et solidaire, avril 2020.

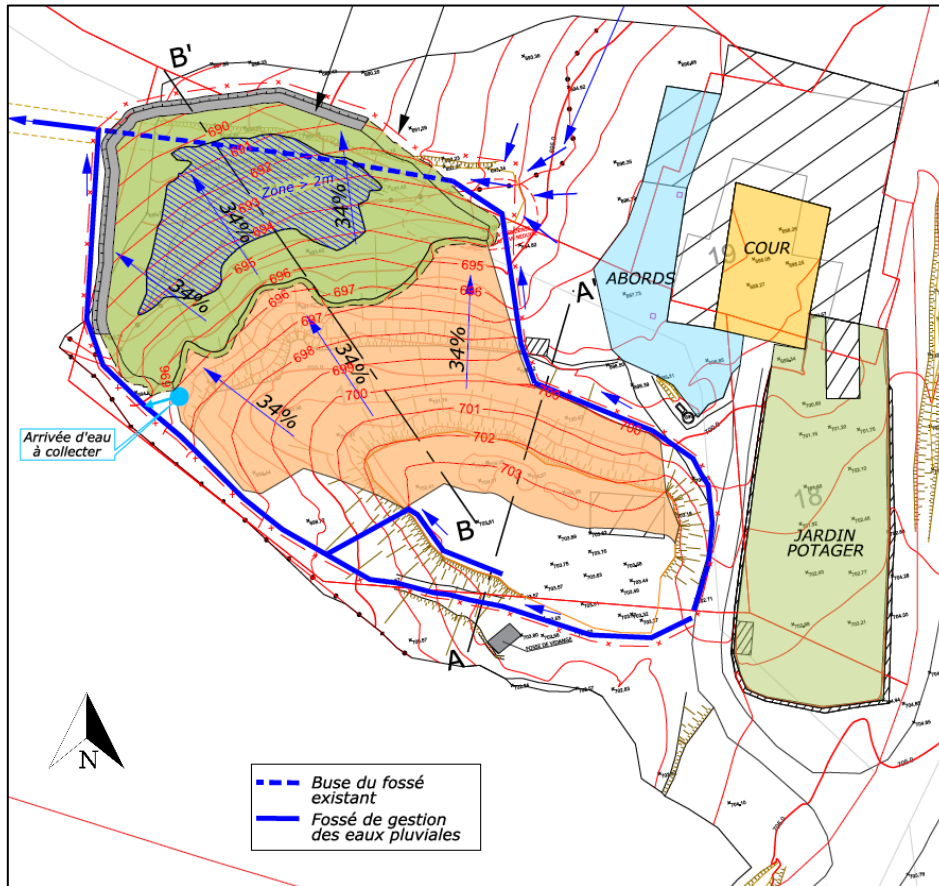


Figure 2. Vue en plan du projet sur le stock T1 – Mise en évidence de la géométrie en dôme (Source ANTEAGROUP)

Le problème est présenté sur la figure 3. Dans le sens de la pente, deux forces s'opposent :

- l'effort en traction maximal ( $T_{max}$ ) dû à la force exercée par les terres de recouvrement dans le sens de plus grande pente ;
- la résistance en traction ( $R_t$ ) du géosynthétique qui résulte des résistances à la traction longitudinales et transversales ( $R_{tL}$  et  $R_{tT}$ ).

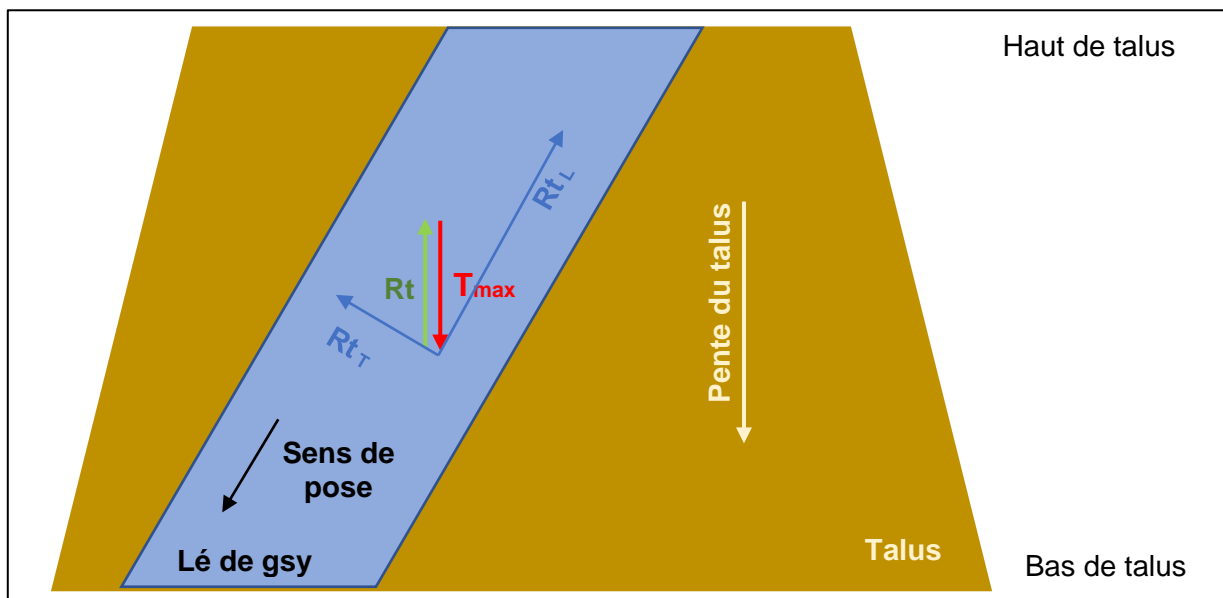


Figure 3. Schématisation du problème d'étude (source ANTEAGROUP)

Pour définir l'angle admissible entre la pente du talus et le sens de pose du géosynthétique, il convient de trouver l'angle  $\alpha$  tel que  $R_t = T_{max}$ . Le calcul de  $T_{max}$  est réalisé conformément aux recommandations de la norme NF G 38-067.

La résistance à la traction des géosynthétiques peut être représentée par une ellipse avec un grand axe  $R_{tL}$  et un petit axe  $R_{tT}$ .  $R_{tL}$  et  $R_{tT}$  sont les projections de  $R_t$  sur les sens longitudinal (production) et transversal (Fig. 4a), dont les valeurs sont définies dans la fiche technique du produit (résistances caractéristiques  $R_{tkL}$  et  $R_{tkT}$ ). Cependant, le tracé détaillé de l'ellipse de résistance à la traction n'est pas connu en tout point, et sans données du constructeur pour le matériau envisagé, il est considéré, de manière sécuritaire, que la norme de la résistance est bornée par l'hypoténuse du triangle formé par  $R_{tL}$  et  $R_{tT}$  (Fig. 4b).

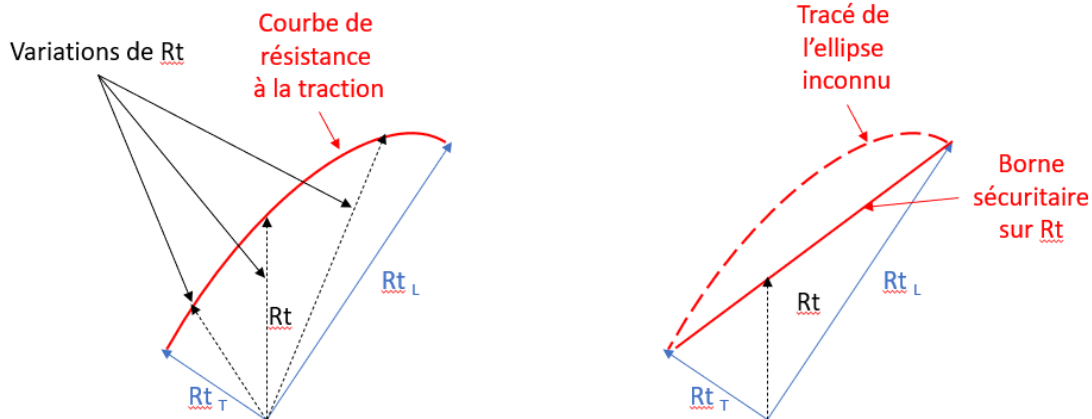


Figure 4 : 4a (à gauche) et 4b (à droite) : Illustration des hypothèses retenues (Source ANTEAGROUP)

Pour les calculs, en lien avec la norme NF G 38-067, les projections de  $R_t$  sur les axes longitudinal et transversal sont comparées aux valeurs caractéristiques des fiches produits, diminuées par des facteurs de sécurité (valeurs de calcul  $R_{t,dL}$  et  $R_{t,dT}$ ).

La figure 5 présente le triangle ABC dans lequel sont menés les calculs pour définir  $\alpha$ .

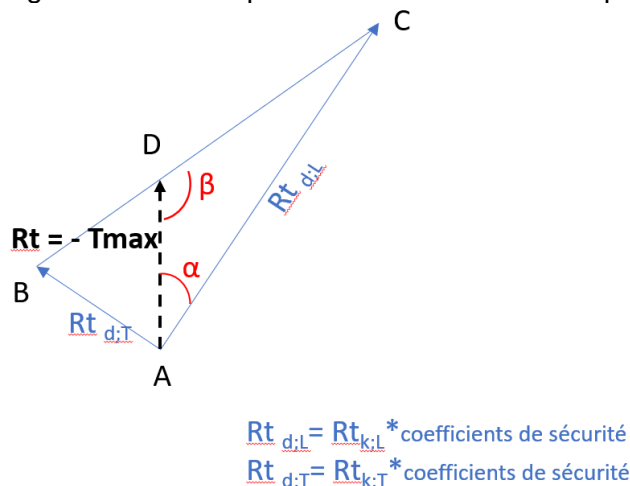


Figure 5. Schématisation mathématique du sujet d'étude (Source ANTEAGROUP)

### Présentation des calculs

Par ailleurs,  $T_{max}$  est obtenu selon les calculs détaillés dans la norme NF G 38-067

À l'aide des formules de trigonométrie, utilisées pour le triangle rectangle présenté ci-avant, il est donc possible de définir la valeur des angles C et B.

Dans le triangle ADC, à l'aide du théorème des sinus dans un triangle quelconque, l'angle  $\alpha$  (représentant l'angle maximal de pose entre les lés et la pente du talus) est obtenu.

Les calculs aboutissent à  $\alpha = 12$  degrés.

Les figures 6 et 7 présentent le plan de pose des géocomposites intégrant cette valeur.



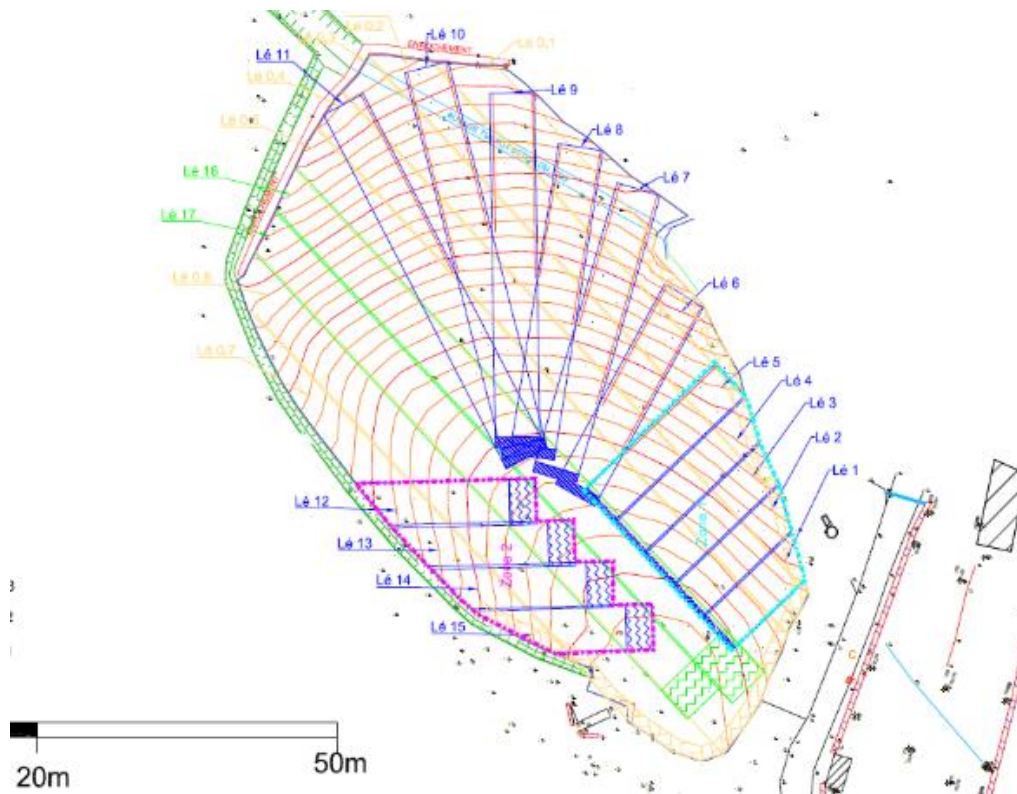


Figure 6. Plan de calepinage des lés d'accroche-terre sur T1 (Source MONTAGNIER TP)



Figure 7. Vue de la pose de la barrière physique permettant la mise en place des matériaux sains (source BRGM)

### 3. Jardins

#### 3.1. Mesures constructives

Les prescriptions du guide relatif aux mesures constructives utilisables dans le domaine des Sites et Sols Pollués (SSP)<sup>2</sup> ont été respectées dans la limite des contraintes de chaque site. Les principales prescriptions appliquées, notamment celles concernant l'épaisseur et la constitution des couvertures végétales, ont été adaptées selon l'usage des parcelles étudiées (50 cm pour les potagers, 30 cm ailleurs) en concertation avec la DREAL et le Ministère de la Transition Ecologique / Direction Générale de la Prévention des Risques.

Ainsi, une phase de décaissement (60 cm dans les potagers, 30 cm dans le jardin d'ornement) est réalisée avant la mise en place de la barrière physique sur des épaisseurs semblables afin de conserver les altimétries existantes. Des ajustements topographiques ont été nécessaires de manière ponctuelle (murs et murets, accès pour véhicules des habitants). Les matériaux décaissés ont été intégrés dans les travaux de réhabilitation des stocks de résidus à proximité immédiate (stocks T1 et T2).

En plus des travaux de réhabilitation, des restrictions d'usage sont prévues, par exemple ni plantations d'arbres ou arbustes, ni affouillements pouvant remettre en cause la couverture réalisée.

#### 3.2. Jardins potagers - barrière physique de couverture

Pour le recouvrement des jardins potagers, une barrière physique est mise en place afin d'empêcher l'accès aux résidus miniers (ingestion et inhalation) et de protéger les cultures vis-à-vis de la contamination des résidus laissés en place. Cette barrière est constituée de bas en haut des éléments suivants (Figures 8 et 9) :

- complexe TERASTOP® de chez TERAGEOS, associant un géotextile anti-contaminant de filtration/séparation (dans le but de limiter la remontée des particules fines) et une grille anti-rongeur (afin de lutter contre le passage des taupes, lapins, etc. qui engendrerait la remontée des résidus via les galeries créées). Ce produit est constitué d'un géotextile non tissé et 100 % polypropylène, muni d'une grille de maille 20 mm en fil d'acier galvanisé de 0,7 mm de diamètre et d'un géotextile non tissé 200 g/m<sup>2</sup> ;
- matériaux granulaires drainants (10 cm d'épaisseur) permettant de limiter la pénétration des racines ainsi que les circulations d'eau dans les dépôts (et des phases dissoutes éventuellement contaminées) ;
- produit PROTEC 800® : géotextile de séparation/filtration. Il s'agit d'un produit certifié ASQUAL, en filaments continus non recyclés, non tissé et 100 % polypropylène ;
- filet avertisseur pour alerter sur la présence de résidus en cas de fouilles ultérieures ;
- matériaux sains type terre végétale sur au moins 50 cm.

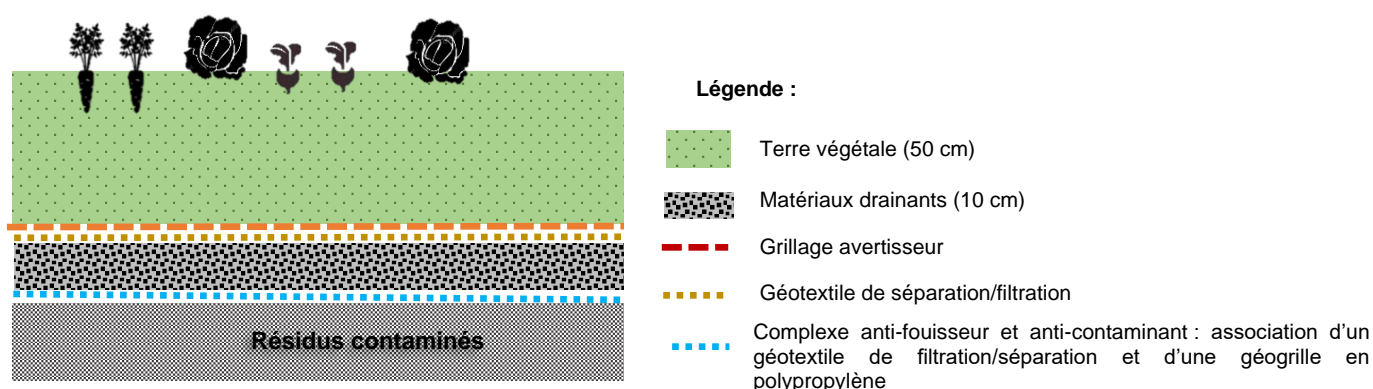


Figure 8. Coupe de principe de la barrière mise en place au niveau des jardins potagers (source ANTEAGROUP)

<sup>2</sup> Guide relatif aux mesures constructives utilisables dans le domaine des SSP, rapport BRGM RP-63675-FR, 2014





Figure 9. Vue de la barrière mise en place au niveau d'un des jardins potagers avant mise en place de la terre végétale (source BRGM)

### **3.3. Jardin d'ornement - barrière physique de couverture**

Pour le recouvrement du jardin d'ornement, une barrière physique est mise en place afin d'empêcher l'accès aux résidus miniers (prévention du risque d'ingestion et d'inhalation). Cette barrière est constituée de bas en haut par :

- un complexe associant un géotextile anti-contaminant de filtration/séparation et une grille de maille 20mm en fil d'acier (identique à celui présenté au § 3.2) ;
- un filet avertisseur pour alerter sur la présence de résidus en cas de fouilles ultérieures ;
- des matériaux sains type terre végétale sur 30 cm ;
- un engazonnement : la végétalisation du sol est indispensable pour limiter l'érosion et l'envol de poussières.

Ce type de jardin ne faisant pas l'objet de plantations à but alimentaire et étant moins arrosé, la barrière ne comporte pas de couche en matériaux granulaires drainants.

## **4. Caves**

L'une des habitations possède 2 caves situées directement au droit de l'habitation en sous-sol. Les sols (terre-battue) et murs (pierres) présentaient des teneurs importantes en plomb.

Ces caves présentent des contraintes d'accès avec des plafonds bas (1,6 m de hauteur) et des entrées étroites (0,7 à 0,9 m de largeur). Par ailleurs, il n'est pas envisagé de décaisser le sol de ces caves en raison de l'incertitude sur le mode de fondation et le rôle de soutènement de l'un des murs par rapport à la route sus-jacente.

Deux solutions de réhabilitation ont été étudiées (Tableau 1) par le maître d'œuvre en phase Projet, afin de recouvrir le sol par un matériau présentant une faible épaisseur : béton de propreté ou géocomposite de ciment.



Tableau 1. Tableau comparatif des solutions étudiées en phase Projet pour la réhabilitation des sols dans les caves

Solution de réhabilitation	Coût estimatif (€ HT)	Durée prévisionnelle des travaux	Avantages techniques (délai, encombrement, sécurité...)	Inconvénients techniques (délai, encombrement, sécurité...)	Maintenance et entretien
Béton de propreté	24 k€	1 semaine hors séchage	Solution classique, maîtrisée	Nécessité de décaisser, dans des conditions complexes (accessibilité, sécurité/santé des travailleurs en milieu confiné)	Réparation des épaufrures ou écaillages en cas de chute d'objet
Géocomposite de ciment	20 k€	3 jours hors séchage	Solution innovante : gain de temps et d'épaisseur. Pas de décaissement dans des conditions complexes	Aucun	Balayage des fibres de surface qui partiront dans les 2 années suivant la pose

Le géocomposite de ciment est composé de deux géotextiles entre lesquels est placée une couche d'un mortier sable/ciment. L'ensemble est aiguilleté en usine de manière à permettre aux fibres des deux géotextiles de se lier entre elles, de renforcer la base du mortier et de rendre le produit utilisable en rouleau. Une fois mis en œuvre, le produit est hydraté par arrosage afin de former une couche de béton fibré à la surface régulière, assurant un rôle de protection mécanique. Ce géocomposite, de 1 mm d'épaisseur au minimum, présente une masse surfacique de 12 kg/m<sup>2</sup>.

À partir de ces éléments comparatifs, il a été retenu la mise en œuvre d'une barrière physique constituée d'un géocomposite de ciment TILTEX ou équivalent ; en effet, cette solution présente a priori des facilités de mise en œuvre sans surcoût tout en permettant d'obtenir une résistance mécanique suffisante.

Après nettoyage des murs et plafonds, les travaux auraient dû consister en :

- la préparation du support (aplanissement, enlèvement des éventuels blocs saillants), avec apport de sables ou graves fines si nécessaire,
- la mise en place du géocomposite de ciment sur toute la surface des sols des caves,
- l'arrosage du géocomposite de ciment, afin de lui donner sa résistance mécanique.

Au moment de réaliser ces travaux, il s'est avéré que la mise en œuvre d'un géocomposite de ciment présentait des inconvénients majeurs, en raison notamment du poids des lés et de l'exiguïté des caves (ergonomie de travail pour les salariés de l'entreprise) et également au niveau des finitions attendues par les propriétaires ; en effet, les sols ainsi que la base des murs étant très irréguliers, les finitions n'auraient pas été suffisamment soignées. Il a donc été décidé, après préparation du sol support incluant un décapage de quelques cm d'épaisseur, de réaliser un béton de propreté en béton fibré de 5 cm (Fig. 10).

Sur tous les murs, un enduit (chaux/sable) a été réalisé afin de recouvrir les pierres et joints, pouvant comporter du minerai de plomb.

Une protection de la zone (balisage adapté, aspiration des poussières) a également été réalisée pour protéger les habitants et les travailleurs vis-à-vis des émanations de poussières éventuelles (poussières chargées en métaux lourds).

Des travaux spécifiques (drains, réseau électrique, etc.) ont été associés à la mise en place de la barrière physique tout en conservant les équipements existants.



Figure 10. Vues d'une des caves avant les travaux (à gauche) et après travaux (à droite)  
(source BRGM)

## 5. Conclusion

La diversité des produits géosynthétiques a permis d'apporter des solutions adaptées à la réhabilitation de sites impactés par d'anciennes exploitations minières.

Sur les stocks de résidus, l'association de plusieurs produits géosynthétiques a permis la mise en place d'une épaisseur de terre nécessaire au bon développement d'une végétation adaptée aux conditions climatiques du site.

Dans les jardins, afin de réduire les risques de remontée de matériaux pollués via les terriers creusés par d'éventuels fousseurs, un dispositif combinant des produits géosynthétiques a été mis en œuvre.

## 6. Bibliographie

AFNOR (2017) NF G38-067 Géosynthétiques, géotextiles et produits apparentés – Stabilisation d'une couche mince sur pente – Justification du dimensionnement et éléments de conception.

Comité Français des Géotextiles et Géomembranes (1995). Recommandations pour l'utilisation des géosynthétiques dans les centres de stockage de déchets. Fascicule 11. 53 pages.