

Géologues

Géosciences et Société

Dossier

Sites et sols pollués



Société
Géologique
de France



Une coédition

Anciennes haldes des Avinières (Gard) : la phytostabilisation au service d'une mise en sécurité innovante

Pierre Rossler¹ et Souhir Soussou².

Historique de l'exploitation des Avinières

La commune de Saint-Laurent-le-Minier (Gard) se situe sur la bordure sud des Cévennes (Fig. 1), une zone naturellement riche en métaux (horst de Saint-Bresson). L'exploitation minière sur la commune est connue depuis l'Antiquité et le Moyen Âge pour le cuivre, l'or et l'argent, mais ce sont les gisements de plomb et de zinc qui permettront l'essor de l'activité minière et industrielle sur la commune à la fin du XIX^e et au XX^e siècle.

La zone des Avinières, qui surplombe la rive gauche de la vallée de la Vis, a été exploitée de 1875 à 1914, principalement à ciel ouvert. L'exploitation a aussi été en partie réalisée en souterrain, le long de petites galeries suivant les axes de minéralisation et le réseau karstique où le minerai était présent en remplissage de ces cavités. Les stériles d'exploitation étaient poussés en bordure des niveaux et déversés à flanc de coteau (Photos 1 et 2). Le minerai de plomb-zinc oxydé (calamine) était descendu dans la vallée de la Vis le long de deux plans inclinés, où il était calciné dans deux fours à calamine.

Le hameau de la Papeterie, situé en rive droite de la Vis, en face des Avinières, a été le siège d'activités industrielles qui ont perduré au-delà de l'arrêt de la mine et jusque dans les années 1950 ; fours de calcination et de grillage, laveries et usines de flottation se sont succédés, permettant le traitement du minerai exploité dans d'autres mines de la commune. Cette activité industrielle a généré le dépôt de résidus contaminés dans l'environnement du site des Avinières et du hameau de la Papeterie, sous la forme notamment de cinq bassins de résidus de traitement du minerai situés en bord de Vis (Photo 3), et contenant 40 000 m³ de résidus dont les teneurs vont de 1 à 4% en plomb et 4 à 13% en zinc.

Les études préliminaires et le besoin d'une mise en sécurité du site

Les premiers travaux de diagnostic et d'état des lieux des sols de la commune et la prise de conscience du caractère contaminé de l'ancien site minier et industriel des Avinières et de la Papeterie ont lieu dans le courant des années 2000.



Figure 1. Localisation du site.

1. MICA Environnement, Ingénieur Géologue - Chef de projet. Courriel : p.rossler@mica-environnement.com
2. Fertil'Innov Environnement, Présidente. Courriel : s.soussou@fertilinnov-environnement.com



Photo 1. Vue aérienne du site (photo Géoportail).



Photo 2. Vue des haldes de l'ancienne mine de plomb-zinc des Avinières (photo Techdrone).

En 2011, la préfecture du Gard mandate l'ADEME par arrêté pour poursuivre les études dans le cadre de sa mission de gestion des sites pollués à responsables défaillants (les anciens exploitants n'étant plus existants, ou n'ayant pas de successeur encore actif). Un plan de gestion est alors élaboré par les bureaux d'études TESORA et EAUGEO, permettant de mettre en évidence les enjeux sanitaires du site et les voies d'exposition, puis de préconiser les solutions de mise en sécurité. Il ressort de cette étude que les riverains du hameau de la Papeterie subissent une exposition aux métaux (plomb et zinc principalement, mais aussi cadmium et arsenic) par les envols de poussières issues des haldes des Avinières et des bassins

de résidus, situés dans un rayon de 500 m à vol d'oiseau.

L'autre voie de contamination de l'environnement est l'érosion intense subie par les haldes lors des événements pluvieux cévenols qui mobilisent vers la Vis les stériles riches en métaux.

Les études démontrent aussi que grâce au caractère carbonaté de la vallée de la Vis (calcaires du Kimmeridgien) et des haldes d'exploitation (dolomies du Bathonien), le pH basique des eaux ne génère pas de mise en solution des métaux et de migration des métaux vers les eaux souterraines. Les sulfures étant quasiment absents des minerais exploités à l'époque, il n'y a pas non plus de phénomène de drainage minier acide.



Photo 3. Vue aérienne des bassins de résidus miniers situés en bordure de la Vis (photo Techdrone).

Les travaux de mise en sécurité

En 2016, puis en 2019, de nouveaux arrêtés préfectoraux chargent l'ADEME des travaux de mise en sécurité du site des Avinières et de la Papeterie.

Couverture et confortement des bassins à résidus

Pour les bassins de résidus miniers situés en bord de Vis, les solutions suivantes sont retenues :

- excavation des résidus des deux bassins les plus petits (bassins 4-5) et mise en stock dans les trois autres bassins (bassins 1-2-3) ;
- mise en place d'une couverture minérale associant un géotextile, une couche de 30 cm de terre végétale propre et la revégétalisation de la surface, afin de stopper l'érosion et les envols de poussières ;
- mise en place d'un réseau de drainage et de gestion des eaux des bassins de résidus ;
- travaux de confortement des murs en béton des bassins qui présentent un état dégradé (Photos 4) : réalisation de micropieux, reprise des massifs d'assise des contre-forts, gunitage de la surface des murs par béton projeté.

Mise en sécurité des haldes des Avinières

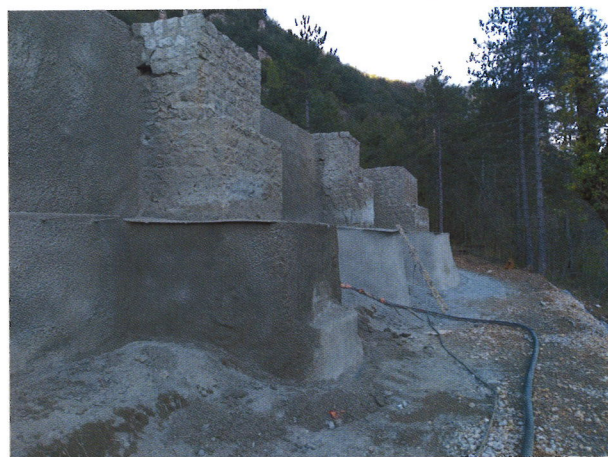
La phytostabilisation des Avinières : l'utilisation des plantes autochtones comme une solution innovante

Les objectifs finaux de la mise en sécurité des haldes des Avinières sont de stopper les envols de poussières, ainsi que l'érosion par le ruissellement.

Compte tenu de la topographie accidentée du site et de son accès difficile, les solutions « classiques » de confinement par la création d'un dépôt par excavation des haldes et stockage sous la forme d'un ouvrage stabilisé n'étaient pas possibles. Les pentes importantes du site rendaient aussi impossible la mise en place d'une couverture minérale ou d'une couverture par géosynthétiques par-dessus les haldes en place.

La technique de phytostabilisation des haldes en place a alors été retenue. Cette technique permet de reconstituer un couvert végétal sur des sols dénudés. Le système racinaire des plantes permet la stabilisation et le système aérien permet de freiner considérablement le pouvoir érosif du ruissellement. Cette technique est particulièrement adaptée pour la réhabilitation de sites présentant des problématiques de réenvols de poussières et d'érosion par ruissellement. Elle présente par ailleurs l'avantage de ne pas nécessiter l'apport de matériaux de recouvrement.

La technique de phytoextraction des métaux par les plantes a été étudiée par le passé sur le site dans le cadre de programmes de recherche, mais n'a pas été retenue. Cette solution aurait consisté à utiliser des plantes hyperaccumulatrices de métaux afin d'extraire les métaux des haldes et de les stocker dans la biomasse des plantes. En effet, l'utilisation de ces plantes aurait nécessité un entretien conséquent du site afin de faucher et récolter annuellement la biomasse produite, puis de la faire éliminer. Outre la problématique des filières d'élimination ou de stockage de cette biomasse riche en métaux, l'absence d'entretien régulier du site aurait pu au contraire aller à l'encontre des objectifs de mise en sécurité, puisque la biomasse riche en métaux aurait pu se disperser ou entrer dans la chaîne trophique. Enfin, et dans la mesure où les métaux auraient



Photos 4. Murs des bassins avant (à gauche) et après (à droite) les travaux de confortement (photos MICA Environnement).

été biodisponibles pour les plantes, le temps nécessaire à l'abaissement significatif des teneurs en métaux dans les haldes et seulement dans leur partie superficielle, aurait été considérable compte tenu des concentrations de départ.

Ainsi, la technique de phytoextraction a été abandonnée au profit de la phytostabilisation des haldes.

La mise en œuvre de cette technique présente plusieurs contraintes mises en évidence pendant les phases d'études réalisées par la société Fertil'Innov Environnement, assistant maître d'ouvrage pour la phytostabilisation :

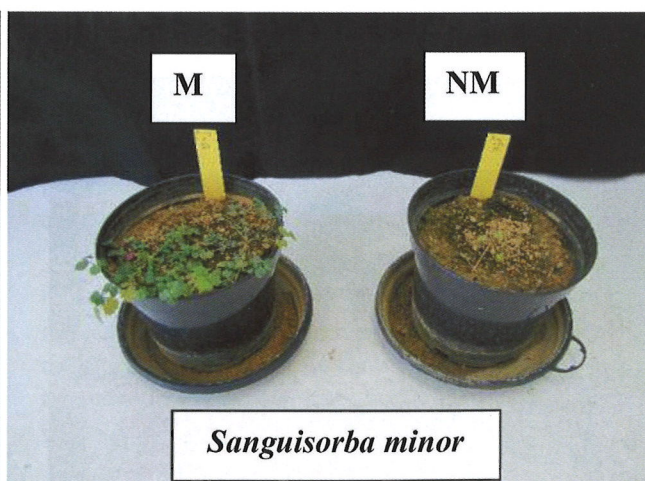
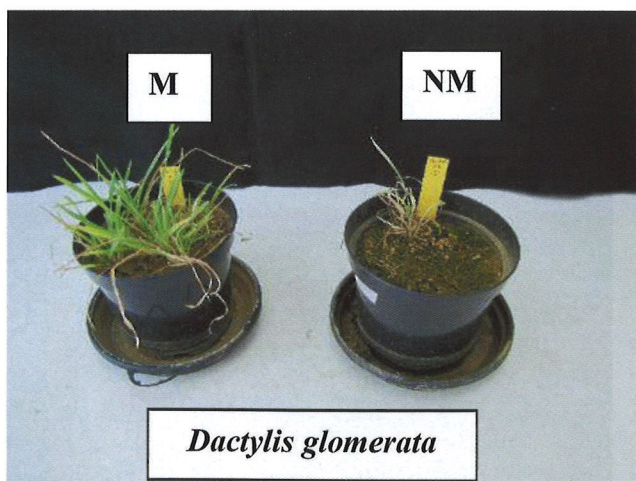
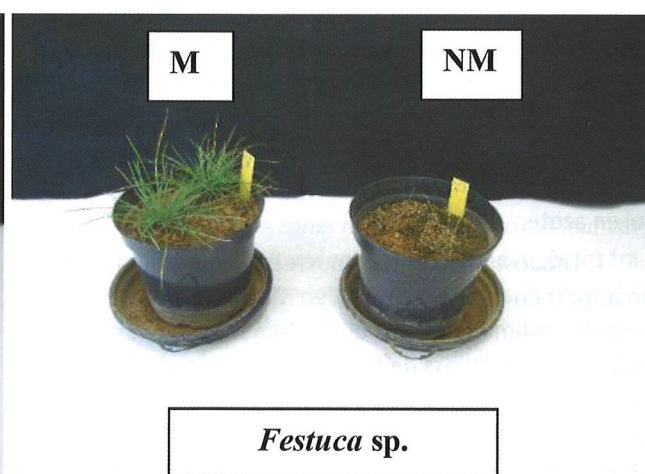
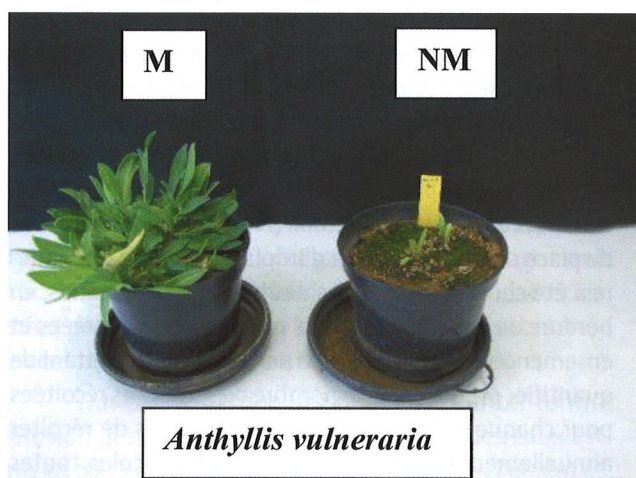
- les haldes présentent des teneurs en Éléments Traces Métalliques (ETMs) importantes : plomb, zinc, cadmium, arsenic, etc. ;
- les haldes, constituées principalement de dolomies et de calamines, sont très pauvres en nutriments. N'étant pas, ou très peu végétalisées, elles sont dépourvues de couche d'humus ;

- les haldes, constituées de stériles d'exploitation de granulométrie très variable (allant du sable au bloc décimétrique), présentent un substrat drainant pour la végétation ;

- les haldes présentent une exposition sud-est.

Les essais réalisés en laboratoire ont démontré qu'à cause des teneurs importantes en ETMs des sols et de la pauvreté en nutriments des haldes, les espèces du commerce sont incapables de se développer sur le substrat constitué par les haldes (Photos 5).

Par contre, des espèces métallicoles autochtones du site ont réussi à développer une résistance aux métaux contenus dans les haldes et parviennent à se développer dans ce milieu particulier (Photos 5). Elles sont aussi adaptées aux conditions climatiques particulières des Avinières. C'est donc l'utilisation de ces plantes métallicoles autochtones qui a été retenue comme la solution de mise en sécurité.



Photos 5. Essais réalisés en laboratoire démontrant l'incapacité des plantes du commerce à se développer sur les haldes ; M : plantes autochtones métallicoles ; NM : plantes du commerce non métallicoles (photos Fertil'Innov Environnement).

Les planches d'essais in-situ : mise au point du protocole de phytostabilisation

En 2019, des planches d'essais ont été réalisées sur le site afin de tester et de définir le protocole de phytostabilisation. Une liste d'une dizaine d'espèces métallicoles a été retenue. Ces espèces doivent répondre aux critères suivants :

- développement rapide d'un couvert végétal dense ;
- système racinaire dense et développé pour la stabilisation des sols ;
- pas de plantes accumulatrices de métaux pour ne pas disséminer les métaux dans la chaîne alimentaire.

L'objectif est de recréer l'écosystème observé sur les quelques zones végétalisées du site et donc de s'appuyer sur la biodiversité locale.

Plusieurs espèces ont été impliquées : graminées, crucifères, légumineuses, ... Les espèces appartenant à la famille de légumineuses ont été sélectionnées dans le mélange pour leur capacité naturelle à enrichir le sol en azote. Les légumineuses sont biofertilisées par apport de microorganismes symbiotiques autochtones au site, collectés *in situ* et mis en culture en laboratoire. Ces microorganismes symbiotiques permettent aux légumineuses de fixer l'azote atmosphérique et d'enrichir peu à peu le sol en azote.

Le substrat étant très pauvre en matière organique, un apport en compost enrichi en MIATES (Matières d'Intérêt Agronomique issues du Traitement des Eaux) s'est avéré nécessaire lors de la mise en place des planches d'essais (Photos 6). D'autre part, le positionnement de géofilet en fibres de coco au niveau des zones en pente a amélioré l'accroche des graines et leur germination par le maintien de conditions humides au contact du sol. Enfin, un arrosage lors des premières années du déve-

loppement du couvert végétal est important afin de favoriser le développement des systèmes racinaires.

La pépinière : production des semences métallicoles

Les haldes qui doivent être végétalisées représentent une surface d'un peu plus d'un hectare. Compte tenu des taux de germination mesurés en laboratoire, qui sont relativement faibles pour les semences métallicoles comparées à des espèces du commerce, une quantité d'environ 140 kg de semences sera nécessaire au semis.

Cette quantité de semences ne pouvant pas être récoltée à partir des plantes sauvages localement présentes, il a été nécessaire d'envisager la mise en culture de ces plantes métallicoles pour produire les quantités de semences qui seront utilisées pour la phytostabilisation.

Cette mise en culture présente une contrainte majeure : les plantes métallicoles cultivées sur un substrat « classique », dépourvue de métaux, peuvent perdre rapidement leur faculté de résistance aux métaux présents dans le sol. Les semences produites à partir d'espèces métallicoles mises en culture dans une pépinière existante ne seraient donc plus adaptées au contexte particulier des haldes. Il a donc été nécessaire de créer une pépinière *in situ*, permettant de cultiver ces espèces sur le substrat contaminé en métaux (Photo 7). Pour des raisons de place disponible, le site d'implantation de la pépinière a été choisi en contrebas des haldes des Avinières, en bordure de la Vis. 2 000 m² de parcelles ont été créées et ensemencées avec une espèce par parcelle, permettant de quantifier précisément le nombre de semences récoltées pour chaque espèce. Cette culture a permis de récolter annuellement 50 à 60 kg de graines métallicoles, toutes espèces confondues, et de constituer ainsi le stock de semences nécessaire à la végétalisation des haldes.



Photos 6. Planches d'essais in situ réalisées sur les haldes, 1 mois après le semis (à gauche) et 18 mois après le semis (à droite) (photos Fertil'Innov Environnement).



Photo 7. Pépinière de production des semences métallicoles au printemps 2020 (photo MICA Environnement).

Les travaux de réaménagement des haldes

Avant l'ensemencement final des haldes qui aura lieu au printemps 2022 (avec une reprise à l'automne), des travaux de réaménagement des haldes vont avoir lieu :

Travaux de terrassement : l'objectif de ces travaux est d'abaisser la pente des haldes qui est actuellement en équilibre limite, afin d'améliorer leur stabilité, de limiter l'érosion de surface et de favoriser la reprise de la végétation. Les travaux de terrassement sont réalisés en déblais-remblais équilibrés par zone, afin de permettre l'exécution des travaux à l'aide de petits moyens mécanisés (type pelle araignée) ne nécessitant pas l'aménagement d'accès de taille importante qui viendraient impacter les zones périphériques aux haldes déjà stabilisées et accroîtraient les émissions de poussières.

Travaux de gestion des eaux : pour lutter contre l'érosion des haldes, un réseau de gestion des eaux est mis en place afin de canaliser les eaux de ruissellement et de les drainer vers l'aval du site. Les ouvrages mis en œuvre sont volontairement robustes (descentes d'eau en enrochements bétonnés, banquettes drainantes compactées, bassins d'atterrissement) et nécessitent peu d'entretien sur la durée. Compte tenu du contexte climatique du site exposé aux épisodes cévenols violents et, conformément aux recommandations de la DDTM du Gard, les ouvrages sont dimensionnés sur la base d'une pluie de période de retour de 100 ans.

Préparation du substrat : pour garantir le bon développement de la végétation, il est nécessaire d'amender les haldes en y incorporant du compost enrichi en MIATES à hauteur de 8% en volume, sur les 30 premiers centimètres. Une attention particulière est apportée aux quantités de compost et à l'homogénéité de son incorporation dans le sol grâce à la réalisation de contrôles spécifiques et réguliers du substrat après préparation.

Des géofiliets en fibres de coco sont aussi posés sur les talus les plus pentus pour favoriser l'accroche des graines.

Mise en place du système d'irrigation : afin de garantir la germination et le développement correct des plantes métallicoles les premières années, il est nécessaire de mettre en place un système d'irrigation. Une installation de pompage dans la Vis permet de remonter l'eau sur plus de 100 m de dénivelé et d'alimenter un réseau d'aspersion. Les apports d'eau sont programmés pour favoriser le développement du système racinaire des plantes en profondeur, l'objectif étant ensuite de réduire peu à peu les quantités d'eau apportées, jusqu'à ce que la végétation puisse subsister par elle-même, uniquement avec la pluviométrie naturelle locale et sans apport d'eau extérieur.

Végétalisation par semis hydraulique : le semis final des plantes métallicoles se fera par semis hydraulique. Cette technique permet d'ensemencer de grandes surfaces en projetant le mélange de graines par voie hydraulique, même sur des surfaces difficilement accessibles. Le mélange projeté contient, en plus des semences, des engrais, des fibres de cellulose et des colloïdes permettant d'apporter aux graines les additifs nécessaires à la germination. Les microorganismes symbiotiques nécessaires à la biofertilisation des légumineuses sont aussi apportés dans le mélange.

Traitement des zones ravinées par fascines : sur certaines zones des haldes ravinées et difficiles d'accès, les travaux de terrassement ne seront pas possibles. Il a donc été décidé de traiter ces zones par la mise en place de fascines. Cette technique de génie végétal basée sur la mise en place de fagots de branches inertes permet de créer des micro-terrasses dans les pentes et de :

- diminuer la vitesse d'écoulement des eaux de ruissellement sur les talus et dans les ravines ;
- filtrer le ruissellement et capter les sédiments ;
- favoriser le développement de la végétation en la protégeant de l'érosion.

Les fascines sont ensuite plantées à l'aide de plants métallicoles spécialement élevés en pépinière après apport de compost au niveau du substrat.

L'ensemble des travaux est réalisé sous couvert de mesures de maîtrise de l'empoussièrement à travers la mise en place de systèmes de brumisation. Un suivi environnemental de l'air et de l'eau est réalisé pendant les travaux, afin de vérifier l'absence d'impact des travaux sur l'environnement.

Le site fera ensuite l'objet d'un suivi pendant deux ans afin de contrôler et éventuellement corriger le développement de la couverture végétale (Fig. 2).

Mise en sécurité des travaux miniers souterrains

L'état des lieux des travaux miniers souterrains a permis de recenser une quinzaine de petites galeries encore accessibles dans l'emprise de l'ancienne mine. Bien que la plupart présentent une longueur limitée ne dépassant pas la dizaine de mètres, une demi-douzaine de galeries constituent un réseau souterrain plus développé qui nécessite que l'accès en soit condamné afin de les mettre en sécurité.

Un inventaire chiroptérologique a été réalisé sur le site sur une année complète afin d'évaluer l'intérêt des galeries pour les chiroptères tout au long de leur cycle biologique. Les résultats de cet inventaire ont mis en évidence que les galeries étaient fréquentées par deux types de chiroptères : le petit rhinolophe et le grand rhinolophe.

Des solutions de mise en sécurité permettant de préserver l'accès aux gîtes pour les chiroptères ont donc été mises en œuvre :

- Pour les galeries peu profondes : le remblaiement des galeries avec des matériaux du site a été retenu. Ces galeries, présentant un faible développement, sont peu favorables aux chiroptères. Cependant, afin de prévenir toute destruction d'individu pendant les travaux, des opérations de défavorabilisation de ces galeries ont été

réalisées avant leur remblaiement : à la nuit tombée, une fois les chiroptères sortis pour se nourrir, des bâches sont posées hermétiquement à l'entrée des galeries et permettent d'en fermer temporairement l'accès. Les travaux de remblaiement peuvent avoir lieu le lendemain sans risque de destruction de chiroptères à l'intérieur des galeries.

- Pour les galeries présentant un réseau de plusieurs dizaines de mètres, intéressantes en tant que gîte pour les chiroptères : la solution de mise en sécurité consiste en la création d'un mur en béton armé d'un mètre d'épaisseur (Photo 8). Une meurtrière à barreaux est laissée en haut du mur, permettant l'accès à l'intérieur pour les chiroptères, mais empêchant toute intrusion humaine. Une buse est aussi placée au pied du mur, permettant l'écoulement des éventuelles eaux d'exhaure, ainsi que l'accès à l'intérieur des galeries pour la faune rampante (reptiles, amphibiens, insectes, petits mammifères).

Les acteurs du projet

L'ADEME

L'Agence de la transition écologique est un établissement public. Dans le cadre de l'application de la circulaire du 26 mai 2011, l'ADEME assure la maîtrise d'ou-

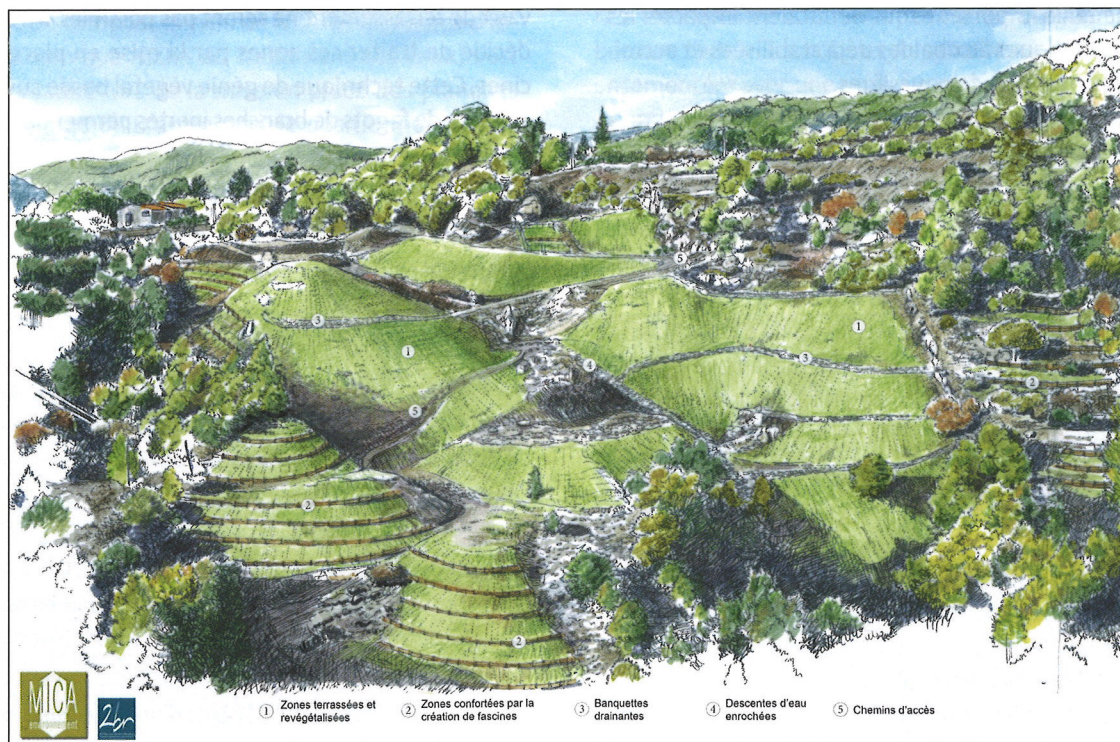


Figure 2. Perspective paysagère du projet de mise en sécurité du site des Avinières (Illustration 2BR).



Photo 8. Mise en sécurité d'une galerie par création d'un mur béton avec accès pour chiroptères (photo MICA Environnement).

vrage des opérations de mise en sécurité des sites pollués à responsables défaillants, conformément aux décisions prises par l'État. Par arrêté préfectoral d'exécution de travaux d'office, le préfet du Gard a missionné l'ADEME.

Fertil'Innov Environnement

Fertil'Innov Environnement est une jeune entreprise innovante (JEI) mettant en œuvre des stratégies d'in-

génierie écologique destinée à la valorisation durable des microorganismes des sols. Elle conseille et assiste l'ADEME en tant qu'assistant maître d'ouvrage chargé de la phytostabilisation afin de définir la stratégie de revégétalisation du site.

MICA Environnement

MICA Environnement est un bureau d'étude spécialisé possédant 25 années d'expérience en réaménagement d'anciens sites miniers et de carrières. MICA Environnement assure la maîtrise d'œuvre du projet : la définition et le design des solutions de mise en sécurité, leur dimensionnement et le suivi des travaux.

MTPS

MTPS est l'entreprise de travaux publics retenue pour la réalisation des opérations de mise en sécurité. C'est une entreprise spécialisée dans les travaux de confortement de zones instables par la réalisation d'ouvrages de génie civil spécifiques (micropieux, clous, parois en béton projeté, ...). Son matériel et ses compétences lui permettent d'intervenir sur des sites d'accès réputés difficiles (travaux en hélicoptère, travaux souterrains, pelle araignée pour intervention en zones très pentues).

Les onzièmes Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur

Les Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur (JNGG) sont organisées sous l'égide des Comités Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique (CFMS), de Mécanique des Roches (CFMR) et de Géologie de l'Ingénieur et de l'environnement (CFG). Cette session 2022 dont le titre est « **Apprendre du passé et construire l'avenir** » permettra d'aborder les thèmes suivants : la conception, réalisation et durabilité des ouvrages géotechniques ; la reconnaissance et auscultation des sites et des ouvrages, ainsi que leur modélisation physique et numérique ; la caractérisation et modélisation des matériaux et géomatériaux ; la gestion des risques, la construction durable ; l'analyse du cycle de vie des géostructures ; l'enseignement et transmission en géotechnique et géologie de l'ingénieur, tout en montrant comment il est possible de capitaliser sur l'expérience collective pour mieux appréhender les nouveaux défis à relever.

Les JNGG 2022 accueilleront également une exposition technique qui permettra aux différents intervenants de la profession (entreprises, bureaux d'études, fournisseurs de matériels et de logiciels) de promouvoir leurs activités et leurs produits.

Ces journées se dérouleront à la cité internationale de Lyon du **28 au 30 juin 2022**.

■ <https://jngg2022.sciencesconf.org/>

