

hors ■ série 37

hors-série  
37

# mines

n° 339  
Octobre 2025

# & carrières

## DOSSIERS

### Poussières et installations de traitement Synthèse des bonnes pratiques



### Réaménagement en milieu difficile Mine des Avinières

Tachéroux - Adéme

D. Collignon

Une revue  
de la Société de  
l'industrie minérale



170  
ans de la SIM



19



20



32



37

## 18 Terrassements, gestion des eaux et végétalisation en milieu difficile

### Exemple de réaménagement de la mine des Avinières

#### 21 Les Avinières : aperçu historique et géologique

- 21 L'essor industriel
- 21 Le minerais
- 22 Un peu de gîtologie et de géologie
- 23 Une source de métaux
- 23 Un piège
- 23 Un fluide de transport
- 24 Le transport du minerais entre les Avinières et la gare de Ganges
- 24 Conclusion

#### 26 La mine des Avinières : aperçu historique de la concession et de l'exploitation

- 26 Les concessions minières dans le secteur de Saint-Laurent-le-Minier
- 27 Histoire de la concession de Saint-Laurent-le-Minier
- 27 Chronologie des travaux des Avinières
- 27 Méthode d'exploitation
- 28 L'abandon de la mine
- 28 Travaux de réaménagement à l'abandon de la concession
- 28 Conclusion

#### 30 Mise en sécurité de l'ancienne mine des Avinières par phytostabilisation : un chantier innovant et réussi

- 30 La mise en sécurité des haldes des Avinières
- 31 L'action de l'Ademe concernant les sites à responsables défaillants
- 32 Le suivi de la couverture végétal
- 33 L'hommage à Patrick Jacquemin

#### 34 Réaménagement avec des techniques modernes : phytostabilisation des haldes minières de l'ancien site des Avinières

- 34 Une utilisation innovante de la flore autochtone pour une revalorisation écologique d'un site minier
- 35 Méthodologie de la phytostabilisation des Avinières : étapes et approche
- 35 Contrôle et amélioration de la qualité du substrat minier
- 35 Essais en laboratoire
- 35 Mise en place d'une pépinière *in situ* pour multiplier les espèces autochtones
- 36 Essais *in situ*
- 36 Travaux de phytostabilisation des haldes des Avinières
- 36 Travaux de terrassement du site
- 36 Amendement du substrat
- 36 Mise en place du système d'irrigation
- 36 Travaux de végétalisation
- 36 Surveillance de la végétation : clé de réussite
- 37 Conclusion

#### 38 Conclusion : l'opération de réaménagement menée sur le site des Avinières est une réussite totale



Journée technique du 25 avril 2024

# Terrassements, gestion des eaux et végétalisation en milieu difficile.

## Exemple de réaménagement de la mine plomb-zinc des Avinières

Le district de la SIM s'est retrouvé à Saint-Laurent-le-Minier (Gard) le 25 avril 2024 pour visiter le site réaménagé de la mine plomb-zinc des Avinières.



Vue du site réaménagé des Avinières.

La mine des Malines a été une grande mine de zinc française, avec une production de l'ordre de 1,1 million de tonnes de zinc et environ 250 000 tonnes de plomb pendant le siècle de sa durée de vie ; l'exploitation de Peñarroya est la plus connue de bien des géologues et ingénieurs miniers actuels ; elle avait été précédée par une exploitation par petites galeries et en ciel ouvert au bord de la rivière Vis dans les années 1875-1914 (les Avinières) ; la remise en état de ces très vieux travaux exploités par un concessionnaire précédent n'avait pas été mise à la charge de Peñarroya à la fermeture de 1984, et a été réalisée très récemment sur fonds publics (Ademe).

Ce sont ces travaux de remise en état qui faisaient l'objet de la visite technique du 25 avril 2024 ; certes exécutés sur une ancienne mine de zinc, ces travaux présentent des caractéristiques qui les rendent exemplaires dans d'autres situations où la remise en état s'opère dans des pentes raides et sur des terrains peu fertiles.



Les participants de la SIM, lors de la visite du 25 avril 2024.

À l'invitation du district Occitanie de la Sim, un groupe de 19 personnes remplissaient donc peu à peu la salle du restaurant "Les Clauzes" à Saint-Laurent-le-Minier (à environ 80 km au nord de Montpellier) le jeudi 25 avril 2024, vers 9 heures du matin ; ils venaient essentiellement d'Occitanie (Alès, Bédarieux, Montpellier, Toulouse...) mais aussi de régions plus lointaines.



Sur le terrain, exposé sur la végétalisation du site.



Devant une galerie fermée, connaissance des milieux des chiroptères.

La journée a commencé par un café d'accueil suivi du déroulement des exposés introductifs destinés à faciliter la compréhension générale des travaux exécutés :

- Introduction de la journée technique du district Occitanie de la Sim (Alain Liger, ex Drire).
- Présentation de la journée (Lionel de Lumley, Mica environnement).
- Le rôle de l'Ademe sur les sites pollués (Marc Arguillat, ex Ademe).
- Film Ademe : Travaux de mise en sécurité de Saint-Laurent-le-Minier (ce film est consultable sur youtube : [www.youtube.com/watch?v=2zJH\\_-C7jjs](https://www.youtube.com/watch?v=2zJH_-C7jjs)).
- Le projet de réaménagement de Saint-Laurent-le-Minier et sa mise en œuvre (Pierre Rossler, Mica environnement).
- Les techniques modernes de phytostabilisation (Souhir Soussou, Fertil'Innov environnement).
- La géologie du site des Avinières, l'extraction et le traitement du minerai (Gérard Verraes, ex Peñarroya).

Elle s'est poursuivie en fin de matinée avec une première visite de terrain ; les participants ont pu constater l'efficacité des techniques de terrassement, de gestion des eaux et de revégétalisation à l'aide de plantes spécifiques des milieux métalliques et de micro-organismes symbiotiques et voir une entrée de vieille galerie avec un aménagement pour l'habitat des chauves-souris ; le spécialiste présent (Julien de Cosmi, chiroptérologue) a complété les descriptions des exposés du matin.

L'après-midi a été consacrée au confinement de résidus miniers ; l'usine aujourd'hui disparue avait en effet mis en place un bassin à résidus d'un volume de



Les ruines de l'ancienne usine et leur mise en sécurité



Réaménagement des bassins avec fossé étanché en géomembrane.



La pépinière le jour de la visite.



La digue à stérile du site des Malines.

4 500 m<sup>3</sup> sur une pente raide, qui a fait l'objet d'un confortement avec voile béton et micropieux.

La pépinière qui a été créée pour la revégétalisation du site est proche de ce bassin et la visite a été conduite par Souhir Soussou (Fertil'Innov environnement), expert en phytostabilisation mise en œuvre sur le chantier.

En fin d'après-midi, après avoir quitté ce projet Ademe, un arrêt en bord de route a permis de visualiser le site de la digue à stériles de l'ancienne mine Peñarroya (maintenant Recylex), et constater sa grande dimension (90 m de hauteur), et sa revégétalisation. ■

*Alain Liger, président du district Occitanie de la Sim*

## Les Avinières

# Aperçu historique et géologique

Les Mines des Avinières et des Malines sont des exemples de la richesse minière des Cévennes.

Les Avinières font partie de toute une série de gîtes exploités ou mis en évidence par recherches qui se rencontre le long de la bordure cévenole entre Landas au nord d'Alès et Soubes vers Lodève. Ils ont été regroupés par les géologues sous le vocable de "province sous-cévenole".

Le tonnage métal estimé de cette "province" est de 2 millions de tonnes.

### L'essor industriel

Pour comprendre les Avinières telles que l'Ademe les a rencontrées pour les réhabiliter il faut se reporter en 1871 quand l'aventure du zinc dans le sud de la France a explosé. La découverte de ce gisement a en effet été à l'origine d'une véritable "ruée vers le zinc" qui a entraîné, en moins de 30 ans, le creusement de plusieurs centaines de travaux miniers, et aussi des opérations spéculatives importantes.

La situation politique européenne est alors dominée par la Prusse dont le roi a été proclamé empereur d'Allemagne à Versailles en janvier 1871. La Prusse occupe une bonne partie de la France et a annexé par conquête la plupart des moyens de production du zinc

en Europe avec les mines et fonderies belges. La révolution industrielle en cours a augmenté de façon quasi exponentielle les besoins dans ce métal qui protège le fer par zincage et galvanisation et entre dans la fabrication du laiton très utile dans l'industrie militaire.

Les besoins européens de zinc sont estimés à 400 000 tonnes<sup>1</sup> en croissance il faut donc de toute urgence développer de nouvelles sources de production. Elles vont être en Italie, en Sardaigne, en Algérie, en Espagne, et dans le sud de la France avec le gîte des Avinières découvert en 1871 et fortement exploité pendant une bonne quinzaine d'années. On en aurait extrait 40 000 t de zinc<sup>2</sup> et 10 000 t de plomb associé à 16 t d'argent<sup>3</sup>.

### Le minerais

Le minerai était constitué de "calamines carbonatées"<sup>1</sup> c'est-à-dire un mélange naturel de carbonates hydratés de sulfures et de dolomie. Les composants dominants étaient la smithsonite et l'hydrozincite (carbonate et hydrocarbonate de zinc), la galène souvent en nodules, la blende en enduits terreux gris foncé et un peu de carbonate de plomb. L'ensemble était souvent



Situation géographique des Avinières. Échelle 1:20 000.

associé à des hydroxydes de fer et des argiles (terres plumbeuses des mineurs).

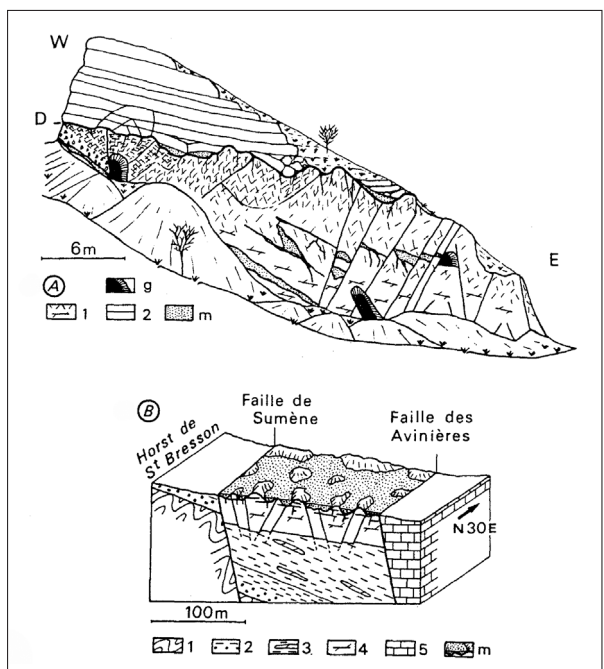
Ce minerai présentait plusieurs intérêts :

- On pouvait le séparer facilement par tri manuel.
- On pouvait l'enrichir de 30 % au moins par passage dans un four à chaux. (on en retirait ainsi l'eau 15 à 20 % et le CO<sub>2</sub> 13,5 %).
- Une fois calciné il entrait directement dans la métallurgie du zinc.

Le gisement des Avinières était lenticulaire, avec une forme grossièrement triangulaire de 100 m x 160 m, et une épaisseur moyenne de 4 m (8 m au plus épais).

Il était pratiquement affleurant, recouvert d'une fine couche de dolomie et d'oxydes de fer, et suivait la pente de la colline.

Il était totalement inclus dans un lambeau de dolomie du Bathonien, limité au nord par un contact par faille avec le socle Cambrien et au sud, au niveau du four, par une faille qui fait partie du faisceau de la rivière la Vis coulant au pied du site. En dessous et très proches sont les marnes noires du Trias mises en évidence par deux galeries et par un sondage.



Cadre géologique des minéralisations dans le gisement des Avinières. Dessin extrait de *Gisements métallifères dans leur contexte géologiques*, Z Johan, D. Ohenstetter, BRGM, 1988.

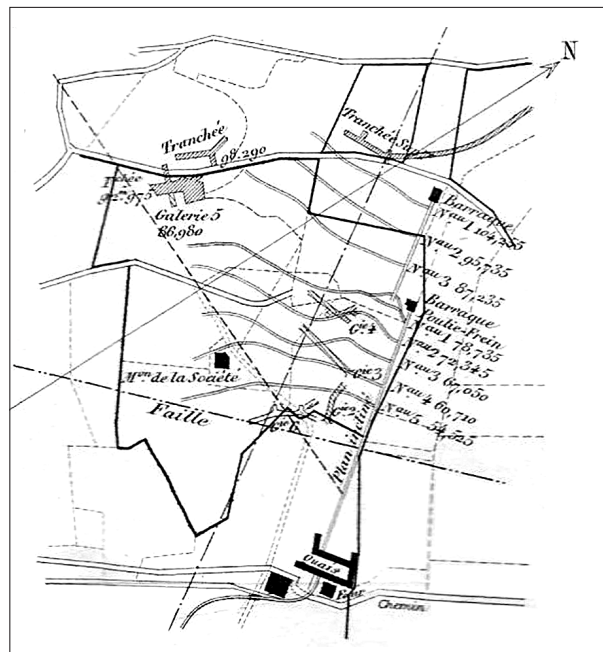
A - Coupe de l'affleurement formant la limite nord du gîte.

- 1 : Dolomie bathonienne devenant de plus en plus bréchique vers son sommet
- 2 : Dolomie de l'Oxfordien
- m : Minerai Pb-Zn oxydé
- g : Entrée de galerie
- D : Discontinuité paléokarstique au sommet du Bathonien

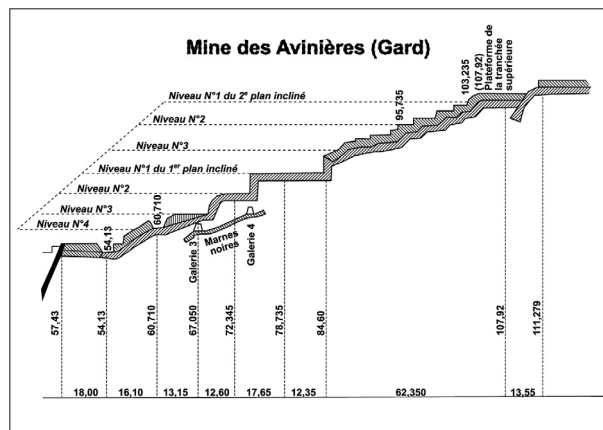
B - Bloc diagramme reconstituant la situation du gisement avant exploitation à partir des observations actuelles.

- 1 : Schistes cambriens
- 2 : Conglomérats et marnes du trias
- 3 : Marnes triasiques
- 4 : Dolomies bathoniennes
- 5 : Calcaires kiméridgiens
- m : Minerai Pb-Zn oxydés

L'exploitation se faisait manuellement par banquettes de 6 m parallèles à la pente, le minerai était trié sur place et descendu vers le four au moyen de 2 plans inclinés. Les "stériles" de tri et de décapage étaient surtout accumulés sur deux terrils qui sont restés intacts jusqu'à la réhabilitation (voir les deux figures ci-dessous de 1875).



Plan des Avinières en 1973. Lithographie de l'ouvrage *Les calamines* de Francis Laur, 1875.



Coupe de l'exploitation en 1875. D'après une lithographie de l'ouvrage *Les calamines* de Francis Laur reprise par Mica Environnement.

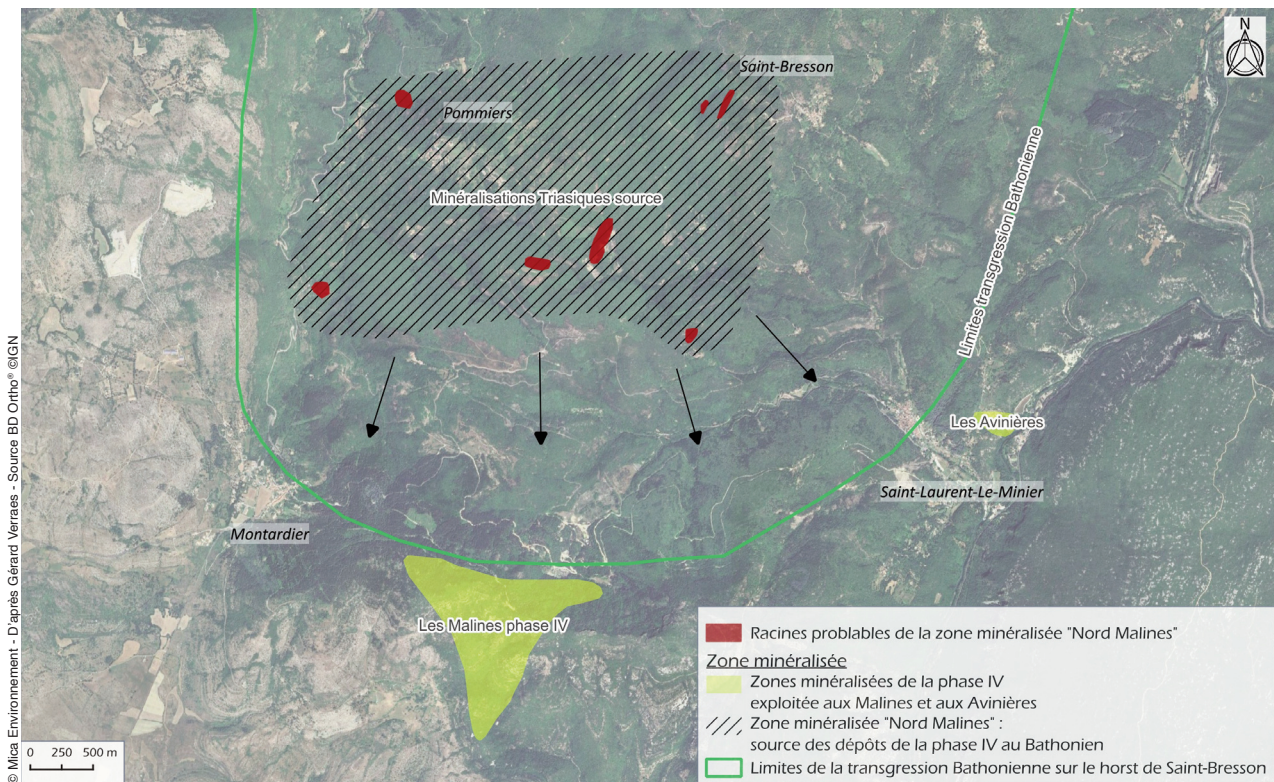
On notera la faible épaisseur du gisement en hachures inverse et la présence des marnes triasiques très proches.

### Un peu de gitologie et de géologie

Pour faire un gisement exploitable il faut : une source de métaux, un fluide de transport et un piège.

La carte ci-après illustrant la genèse de la minéralisation des gisements des Avinières et des Malines indique :

- Les petits amas minéralisés résiduels enracinés dans le Cambrien, racines probables de la zone minéralisée "Nord Malines" (en rouge).
- Les zones minéralisées de la phase IV exploitées aux Malines et aux Avinières (en vert).



Genèse de la minéralisation des gisements des Avinières et des Malines. Échelle 1:35 000.

- La zone minéralisée "Nord Malines", source des dépôts de la phase IV au Bathonien (hachures).
- La limite probable de la transgression bathonienne sur le horst de Saint-Bresson (ligne verte).

### Une source de métaux

Si on regarde la géographie locale on s'aperçoit qu'au nord-ouest des Avinières, dans un rayon de moins de 5 km, existent de nombreux petits gisements de zinc, encaissés dans les formations cambriennes. On peut citer : Mas Lacombe, les Blacouzels, le mas du Court, Pommier, Saint-Bresson, Mas Seguin. Tous ces gisements de zinc et plomb, sont enracinés verticalement sur dix à cinquante mètres et se comportent comme des racines résiduelles d'un gisement actuellement érodé qui aurait occupé la partie nord du Horst de Saint-Bresson. Ce grand gisement dénommé "zone Nord Malines", d'origine sédimentaire ou karstique, ce serait formé au Trias selon le même processus qui aboutira à la création des gisements des Avinières et des Malines au Jurassique.

Les petits gisements du horst de Saint-Bresson en sont les témoins non érodés.

Les formations cambriennes (moins 536 millions d'années) aujourd'hui mises à nu par l'érosion étaient recouvertes de dépôts triasiques (moins 245 à 217 millions d'années) et peut-être Hettangien (moins 200 à 197 millions d'années) comme pour la mine des Malines voisines. Ces formations triasiques formaient des reliefs importants.

### Un piège

Au Bathonien (166 à 161 millions d'années), après une longue période d'émersion et d'érosion, la mer chaude et agitée transgresse doucement sur ces reliefs. Les Avinières comme les Malines sont sur la bande côtière et il s'y dépose des produits grenus formés d'un mélange d'oolithes (sortes de petites dragées de calcaires) et d'entroques (débris de fossiles marins).

La transgression n'est pas franche et rapide et on note dans ce secteur de nombreux arrêts de dépôts et la création locale de chenaux végétalisés, d'eau saumâtre, qui donnera par la suite des lignites. Ces nombreuses émerSIONS engendreront des karsts superficiels qui seront les pièges.

### Un fluide de transport

Les eaux douces, chargées de métaux sous forme de sulfates hydratés, et provenant de l'érosion du gisement au nord-ouest, vont percoler à travers les pièges réducteurs qui vont pouvoir capter une partie de ces métaux sous forme de sulfures. Cela a été aussi le cas aux Malines (Phase 4). Cela a représenté 40 % du métal extrait dans le secteur des Malines. Il est certain que ces phénomènes ne sont pas exclusifs et qu'une bonne partie du zinc érodé a dû rejoindre le milieu marin et s'y diluer.

À la fin du Bathonien, une émerSION sous climat tropical a amené la mise en place de croûtes de limonites qui se sont aussi infiltrées dans les très nombreuses fissures recoupant le dépôt. C'est vraisemblablement à cette époque que se sont oxydés et carbonatés la plus grande partie des sulfures de zinc alors que les sulfures de plomb plus résistants sont restés presque intacts



© Collection Gérard Verraes

Transport du minerai par char à bœuf. Carte postale vers 1900, chinée par un ancien mineur.

dans cette phase se recouvrant seulement d'une pellicule étanche de sulfate.

À la fin de cette période, la partie supérieure du Bathonien est parcourue de rides d'érosion qui vont être comblées par les calcaires marneux de l'Oxfordien discordants (moins 161 à 156 millions d'années).

Après une très longue période sous les eaux pendant tout le Jurassique supérieur qui a permis le dépôt d'une grande épaisseur de calcaires, la région s'est élevée progressivement d'environ 1 000 m, a été faillée puis érodée. C'est à la suite de cette érosion, conséquence de la mise en place des Alpes et des Pyrénées, que le gîte des Avinières s'est retrouvé proche de la surface. Beaucoup d'autres dépôts ont probablement été érodés dans cette période.

On peut estimer que le million de tonnes de métal exploitées dans le secteur des Avinières et des Malines ne représente que moins de 20 % de l'ensemble des métaux remobilisés par l'érosion entre le Carbonifère et le Bathonien.

### Le transport du minerai entre les Avinières et la gare de Ganges

À raison d'une tonne de minerai traité au four, par char à bœuf, il a fallu 83 000 voyages, soit environ 4 200 par an pour transporter tout le minerai de zinc et de plomb entre la mine des Avinières et la gare de Ganges (une tonne de minerai brut trié donne 700 kg de minerai calciné).

À partir de 1881 le minerai des Malines s'est ajouté au trafic. Cela a occasionné toute une organisation de sous-traitance et de petits métiers annexes (maréchaux-ferrants, fabricants et réparateurs de chars,

fournisseurs de nourriture pour hommes et animaux). La première guerre mondiale puis la crise de 1929 entraînant une forte chute des cours des métaux amenèrent à la fermeture de toutes les exploitations en 1934.

### Conclusion

Lorsque l'on étudie l'histoire minière française depuis les Gaulois on s'aperçoit qu'elle est constituée de périodes d'activité intense, séparées par de grandes lacunes.

À chaque reprise d'activité la volonté politique a fait appel à des personnels formés venant de zones dans lesquelles la mine avait une continuité. Dans la région des Avinières, on a l'exemple de la "charte des mines d'Hierle (1227)" dans lesquelles le seigneur local Pierre Bermond De Sauve, donne un statut quasi nobiliaire aux mineurs qu'il a recruté pour remettre en service les mines de Saint-Laurent-le-Minier, arrêtées depuis plus de 100 ans. D'après leurs noms, ces mineurs venaient pour une bonne partie d'Allemagne et pour le reste du nord de la Catalogne.

Nous sommes, en 2024, à la fin d'un de ces épisodes qui a commencé après la guerre avec la volonté de reconstruction et le "baby-boom" et s'est terminé avec la mondialisation et l'accès à des ressources moins onéreuses. Le savoir-faire est déjà en grande partie perdu avec les décès des mineurs, et l'histoire locale est en train d'effacer de la mémoire les sites, leurs caractéristiques et leurs dangers.

Dans ce cadre, l'état doit veiller à ce que les risques résiduels causés par l'activité qu'il avait lui-même autorisée et suivie (concessions) ne soient pas un danger permanent pour les populations futures. La remise en état des Avinières et de beaucoup d'anciennes mines françaises s'inscrit dans cette démarche et elle peut être citée comme un exemple de réalisation.

Si l'histoire de notre pays continue, on peut s'attendre à une reprise d'activité sur ces sites dans une période de forte demande et selon une volonté affirmée de l'état. Ces sites sont loin d'être épuisés, et comme ils sont polymétalliques il y a de forte chance qu'une substance qui n'intéressait pas les mineurs du xx<sup>e</sup> siècle puisse devenir une source d'intérêt dans le futur.

Cela a été le cas dans l'histoire : à l'époque gauloise on recherchait l'or, à l'époque romaine le cuivre, au Moyen Âge l'argent (le plomb et le zinc étaient rejetés dans les stériles et le cuivre donné aux mineurs), à l'époque moderne on recherchait le zinc, dans le futur cela sera ? Bonne chance aux mineurs du futur. ■

Gérard Verraes,

docteur es sciences, ancien directeur de recherches, et ancien géologue résident de la mine des Malines

1. Francis Laur 1875 - Les calamines, étude sur les minerais de zinc, imprimerie Théolier frères Saint Etienne 1875, 509 pages.

2. BRGM 1977 - Ressources minières françaises, tome 2 .pp 66,67, 3 fig.

3. Infoterre 2024

## Bibliographie

- Avias J. et Orgeval J.J. (1974) – *Contrôle hydrogéologique de la formation et de la localisation des gîtes minéraux en général et des gîtes associés aux roches carbonatées en particulier*. Congrès A.I.H., Montpellier, TX, pp.271-275.
- Bernard A. (1972) – *Le rôle métallogénique de la sédimentation intra karstique*. Int. Sedimentological Congress, Heidelberg, 1971. Berlin Springer Verlag, pp.43-57.
- Bernard A. et Foglierini F. (1959) – *Mines métalliques des Cévennes*. 3<sup>e</sup> séminaire Int. Étude géologique. Revue de l'industrie minière, 17p.
- Foglierini F., Bernard A. et Verraes G. (1980) – *Le gisement des Malines (Gard)*. Livret guide du 26<sup>e</sup> C.G.I., Paris 1980.
- Macquar J.C. (1968) – *Contribution à l'étude géologique et métallogénique de la bordure méridionale des Cévennes. Le Trias de la région des Malines (30)*. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Paris.
- Michard A. (1969) – *Les Dolomies. Une revue*. Bulletin du Service de la carte géologique d'Alsace-Lorraine, tome 22, n<sup>o</sup>1, pp. 1-92.
- Orgeval J.J. (1976) – *Les remplissages karstiques minéralisés : exemples de la mine des Malines (30)*. Mémoire hors-série. Société Géologie de France, n<sup>o</sup>7 pp. 77-85.
- Verraes G. (1983) – *Étude monographique du district minier des Malines et de ses environs (province sous-cévenole - France)*. Docteur ès sciences. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier 1983.
- Verraes G. (1986) – *Les Minéralisations formées en milieu réducteur Karstique*. Sci. Géol., Bull., 39, 3, p 233-250, Strasbourg 1986.
- Verraes G. (2010) – *Les processus de minéralisation du gisement des Malines, le règne minéral*. Hors-série XVI, pp 39,46.
- Verraes G. (2010) – *L'histoire géologique du district minier des Malines, le règne minéral*. Hors-série XVI, pp 33,38.
- Verraes G. (2010) – *Historique de la mine des Malines et de ses environs, le règne minéral*. Hors-série XVI, pp 19,28.

## La mine des Avinières

# Aperçu historique de la concession et de l'exploitation

L'histoire de la mine des Avinières est complexe, traduisant des périodes de faste suivies de périodes plus difficiles qui ont abouties à la renonciation de la concession et à la nécessité de reprendre les réaménagements dans une période plus récente.

La métallurgie du zinc est ancienne, mais ce métal, présent dans de nombreux minerais ne faisait pas l'objet de recherches pour lui-même, car il restait allié dans les métaux produits à partir de ces mêmes minerais. La métallurgie du zinc débute véritablement vers le milieu du XVIII<sup>e</sup> siècle où une unité de production de zinc métal à partir de calamines a été fondée à Bristol, en Angleterre, en 1743. Le procédé consistait à provoquer par chauffage la formation de vapeurs de zinc et à les condenser. Ce procédé consommait beaucoup d'énergie.

En France, durant le second empire, l'usage du zinc prend rapidement son essor, car il s'avère un matériau de choix pour la construction. Le zinc voit son usage se généraliser en France suite, notamment, aux travaux de modernisation de la ville de Paris entrepris par le Baron Hausmann : le zinc est alors utilisé pour la réalisation des toitures, des gouttières et du mobilier urbain. C'est dans ce contexte de forte demande en zinc que les

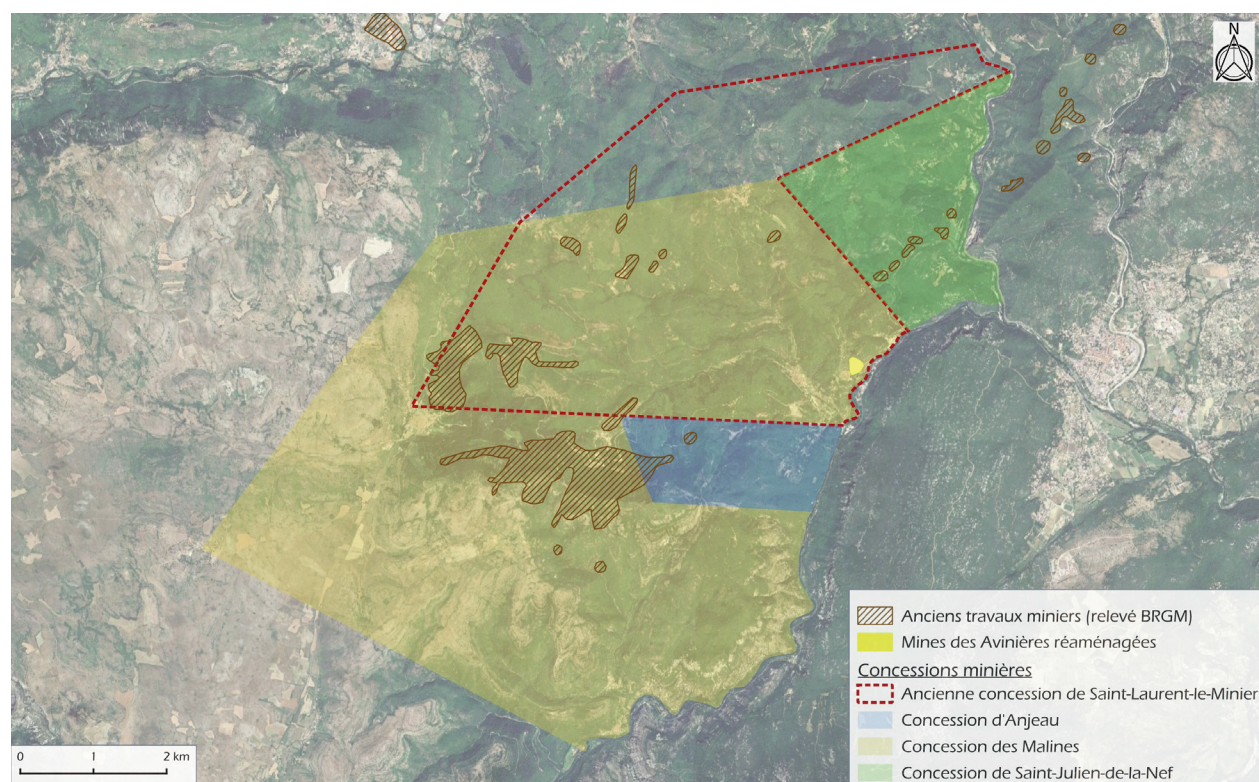
prospections ont redémarré dans toute la province sous-cévenole, aux abords des années 1870-1875, et notamment dans le secteur de Saint-Laurent-le-Minier.

### Les concessions minières dans le secteur de Saint-Laurent-le-Minier

L'essor industriel du XIX<sup>e</sup> siècle va relancer diverses exploitations dans le secteur de Saint-Laurent-le-Minier : du fer est exploité à Saint-Julien-de-la-Nef, à Ferrières et au mont Méjan, tandis que les calamines seront exploitées aux Avinières, à la Sanguinède, au Mas Lacombe dès 1875 dans le cadre de la concession de Saint-Laurent-le-Minier.

Dans les années qui suivent, plusieurs concessions vont être instituées sur le secteur de Saint-Laurent-le-Minier :

- La concession de Saint-Laurent-le-Minier en 1875, et renoncée en 1940, où se trouve le chantier des Avinières, au profit de la Société anonyme des usines à zinc du Midi, puis de la Société des zincs français



Carte des concessions de Saint-Laurent-le-Minier et des Avinières. Échelle 1:60 000.

(1880), et enfin de la Société des mines et fonderies de zinc de la Vieille Montagne.

- La concession des Malines, en 1885, au profit de la société anonyme des Malines, puis de la Société minière et métallurgique de Peñarroya (SMMP) le 29 mai 1961, devenue Metaleurop en 1988, puis Recylex en 2007.
- La concession d'Anjeau, en 1900, au profit de 4 personnes privées, puis de la société des mines d'Anjeau, puis de SMMP en 1949, Metaleurop, Recylex.
- La concession de Saint-Julien-de-la-Nef, en 1880, au profit d'une société civile, puis à la Société des mines de zinc des Cévennes, et enfin de la SMMP en 1949, Metaleurop, Recylex.

## Histoire de la concession de Saint-Laurent-le-Minier

Les travaux miniers de cette concession débutent en 1872 sur le site des Avinières, pour extraire des calamines et de la blende.

La concession de Saint-Laurent-le-Minier a été octroyée le 9 mars 1875 à la Société des usines à zinc du Midi, sur une superficie de 14,28 km<sup>2</sup>. Elle a été agrandie le 3 août 1880 pour atteindre 21,8402 km<sup>2</sup>. À ce moment, La Société des usines à zinc du Midi est dissoute pour créer la Société des zincs français.

En 1884, la Société des zincs français fait faillite et la concession est reprise par la Société anonyme des mines et fonderies de zinc de la Vieille Montagne.

Un rapport de l'ingénieur des mines, daté du 13 avril 1940, fait référence à la pétition en date du 1<sup>er</sup> mars 1939 de la Société anonyme des mines et fonderies de zinc de la Vieille Montagne qui demande à renoncer à la concession des mines de zinc, plomb, argent et métaux connexes de Saint-Laurent-le-Minier. À cette pétition auraient été joints le plan et l'état descriptif des travaux d'exploitation. Un rapport datant du 6 novembre 1939, établi par l'ingénieur des mines M. Pons, relate les travaux d'obturation réalisés dans le cadre de la renonciation.

La concession de Saint-Laurent-le-Minier a fait l'objet de travaux miniers sur plusieurs chantiers :

- Les Avinières, objet du présent document ;
- Fons-Bouillens ;
- Le Crouzet ;
- Mas Lacombe ;
- Les Blacouzels ;
- Mas Seguin ;
- La Sanguinède et Coste Ubade.

L'ensemble de ces chantiers s'est retrouvé dans l'emprise de la concession des Malines lors de l'extension de superficie réalisée en 1968. Seul le chantier de La Sanguinède a fait l'objet d'une reprise de travaux par la SMMP, puis Metaleurop et enfin Recylex.

## Chronologie des travaux des Avinières

Les travaux d'extraction des calamines des Avinières ont débuté en 1872. 110 ouvriers dont 30 mineurs y travaillent. À partir de 1876, la société ouvre d'autres chan-

tiers dans la concession, notamment à Fons-Bouillens, au Crouzet, Mas Lacombe et les Blacouzels.

En 1877, 50 ouvriers sont affectés au chantier des Avinières.

En 1879, la production des Avinières est de 300 tonnes de minerai par mois, alors que le cours du zinc s'effondre. Après la faillite de la Société des zincs français et la reprise par la Société anonyme des mines et fonderies de zinc de la Vieille Montagne, les travaux se poursuivent jusqu'en 1886 et sont suspendus au profit d'autres chantiers, notamment La Sanguinède.

Les recherches reprennent en 1900 pour être aussitôt abandonnées. En 1910, une galerie longue de 60 m trouve un peu de calamine ; en 1913, un travers-banc, lui aussi long de 60 m est réalisé en contrebas dans la vallée, sans résultats probants.

Tous les travaux sont arrêtés en 1914. En 1923, un puits de recherches est foncé, sans résultats. Les travaux sont définitivement arrêtés en 1924, et en 1939, La Société de la Vieille Montagne demande la renonciation à la concession, laquelle est effective en 1940.

L'histoire de la concession de Saint-Laurent-le-Minier et de la mine des Avinières illustrent la vie et la mort d'une exploitation minière et du titre minier auquel cette mine était liée, selon les critères administratifs et environnementaux de l'époque.

Un grand chantier de réaménagement du site des Avinières, initié par l'Ademe, débute en 2018, pour s'achever en 2022.

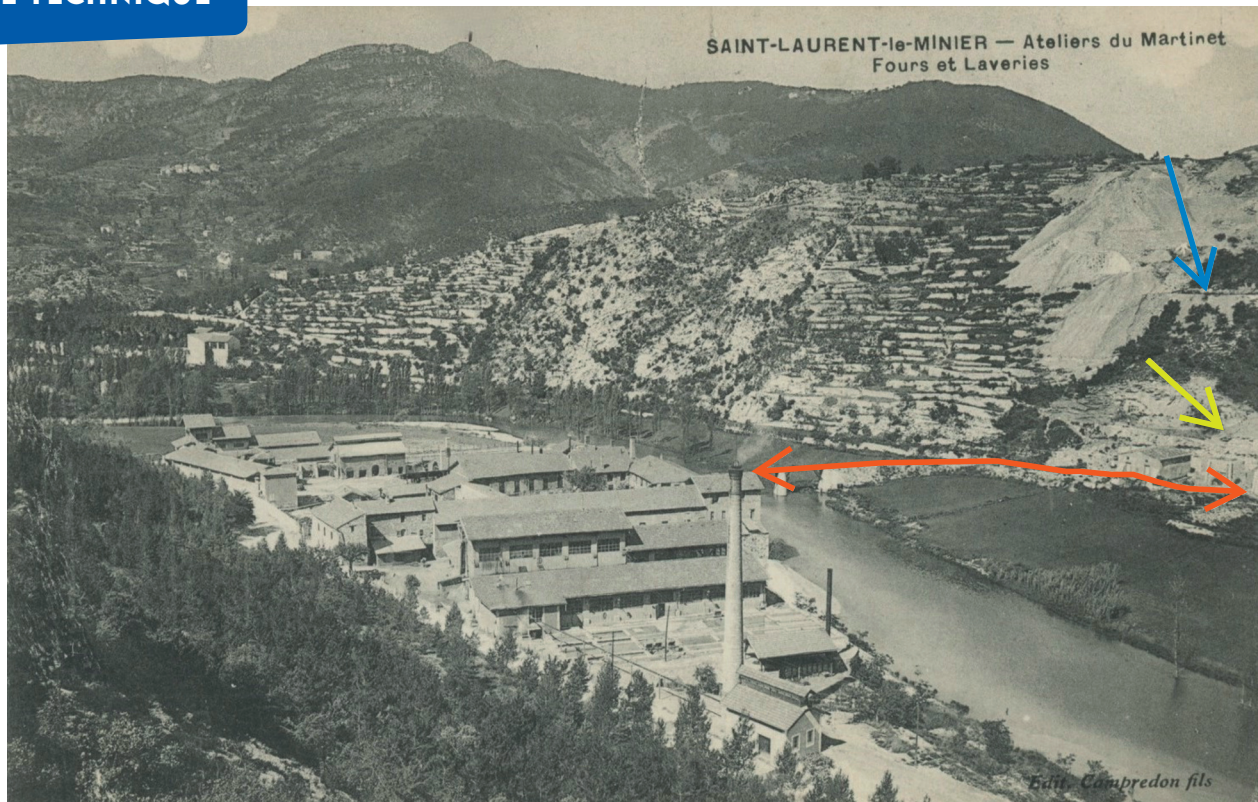
## Méthode d'exploitation

Le minerai était descendu par deux plans inclinés automoteurs. Ces plans inclinés collectaient le minerai provenant de chacun des niveaux : cinq niveaux pour le premier plan incliné inférieur puis trois niveaux pour le second plan incliné supérieur.

L'extraction aux Avinières s'est faite essentiellement à ciel ouvert, le minerai se situant essentiellement en subsurface, cependant quelques galeries ont été ouvertes pour récupérer du minerai en profondeur (au moins 18 galeries).



Une galerie encore visible et mise en sécurité.



Carte postale de la mine montrant les fours et la laverie ainsi qu'une partie de la mine des Avinières. Avec l'aimable autorisation des Inventaires Ferroviaires de France.

Le minerai était ensuite calciné dans deux fours au pied du gisement sur la rive gauche de la Vis. On peut encore voir le pont sur lequel passait une voie ferrée qui reliait ces fours à la rive droite.

Il n'existerait qu'une seule carte postale sur laquelle la mine des Avinières est partiellement visible. Les plans inclinés sont hors-champ à droite. On aperçoit les deux fours (flèche jaune) ainsi qu'une plateforme ferroviaire (flèche bleue). La voie ferrée rejoignant l'usine est indiquée en tirets orange.

### L'abandon de la mine

Vers 1900, les calamines en roches qui ne nécessitaient qu'un traitement rudimentaire, simple calcination dans un four à cuve continu, se font de plus en plus rares. Les nouveaux minerais, calamines mixtes et blendes (sulfure de zinc des Malines) plombeuses, barytiques ou non, devaient impérativement être séparés et enrichis avant de pouvoir être considérés comme marchands. Des procédés très complexes étaient mis en œuvre dans les ateliers de la mine en rive droite de la Vis. Leur inconvénient était la perte d'une quantité considérable de métal, de l'ordre de 16 à 18 % de zinc.

La première guerre mondiale puis la crise de 1929 entraînant une forte chute des cours des métaux amenèrent à la fermeture des exploitations en 1934.

### Travaux de réaménagement à l'abandon de la concession

Les travaux à l'abandon du site (1939), ont été très succincts, et seuls des travaux d'obturation sont mentionnés dans le rapport de l'ingénieur des mines.

Tous les matériels, wagonnets, treuils, rails et plan incliné... ont été récupérés pour servir sur d'autres chantiers.

En 2004, la présence de métaux lourds dans l'environnement du site est signalée et l'État va missionner l'Ademe pour sa remise en état.

Le réaménagement de l'ancienne mine plomb-zinc des Avinières à Saint-Laurent-le-Minier a été réalisé en 2022.

### Conclusion

L'histoire de la concession de Saint-Laurent-le-Minier et de la mine des Avinières illustrent la vie et la mort d'une exploitation minière et du titre minier auquel cette mine était liée, selon les critères administratifs et environnementaux de l'époque, en l'occurrence 1939-1940 (contexte de la "drôle de guerre").

La remise en état trop succincte (mais pourtant conforme aux standards de l'époque) de ces anciens sites est un facteur important des difficultés d'implantation de nouveaux projets de mines ou de carrières ; le cas des sites à responsable absent, défaillant ou trop ancien se présente sur tout le territoire. Des techniques et des moyens existent pour traiter cet enjeu territorial. La mine des Avinières et son réaménagement par l'Ademe est un bon exemple de ce qui est réalisable dans ce domaine. ■

Michel Viard

### Bibliographie

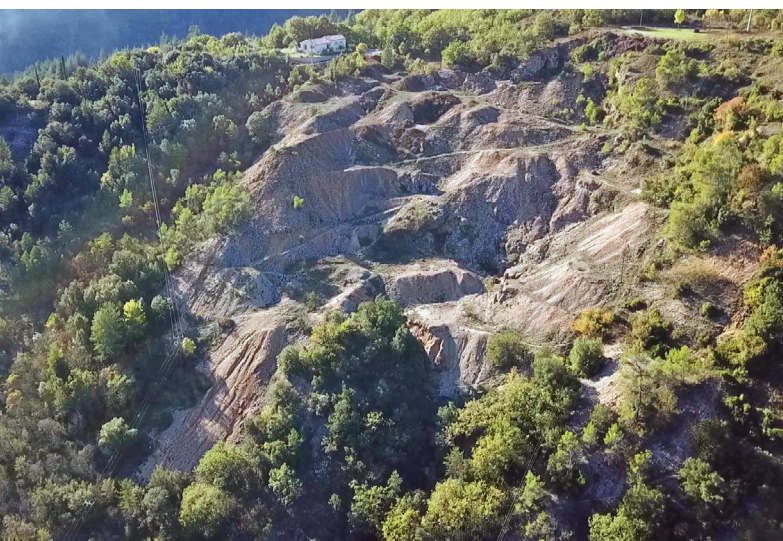
- Foglierini F., Bernard A. et Verraes G. - *Le gisement des Malines*. 26<sup>e</sup> congrès international de Géologie, Paris, 1980.
- Johan Z., Ohnenstetter D. - *Gisements métallifères dans leur contexte géologique*, BRGM, 1988
- Inventaires Ferroviaires de France. [www.inventaires-ferroviaires.fr](http://www.inventaires-ferroviaires.fr)

Eric Marcoux

## Mise en sécurité de l'ancienne mine des Avinières par phytostabilisation

# Un chantier innovant et réussi

Deux ans après la fin des travaux de mise en sécurité de l'ancien site minier des Avinières, la végétalisation des stériles miniers par une technique innovante de phytostabilisation impliquant des espèces végétales métallocoles du site est un véritable succès ayant permis de résoudre les problèmes d'érosion et d'envols de poussières chargées en Éléments Traces Métalliques (ETMs).



Prises de vue par drone de l'ancienne mine de plomb-zinc des Avinières, avant et 6 mois après la fin des travaux.

L'ancienne mine de plomb-zinc des Avinières a été exploitée de 1875 à 1914. Les traces laissées par cette exploitation (dépôts de stériles miniers) et d'autres activités connexes à la mine (bassins de résidus de traitement du minerai) sur la commune engendraient une contamination de l'environnement aux ETMs (plomb et zinc principalement, mais aussi arsenic et cadmium) – voir article *mines & carrières* n° 299, février 2022.

L'ancien exploitant ayant aujourd'hui disparu, l'Ademe a été mandaté par l'État par arrêté préfectoral pour réaliser des travaux permettant de réduire l'exposition des populations et d'assurer la mise en sécurité pérenne du site.

L'Ademe agit en tant que maître d'ouvrage délégué et a confié la mission de maîtrise d'œuvre (conception du projet et suivi de la réalisation des travaux) au bureau d'études Mica Environnement, spécialisé en réaménagement minier.

Une mission d'assistance à maîtrise d'ouvrage pour la phytostabilisation a aussi été confiée à l'entreprise FertilInnov Environnement, spécialisée dans les travaux de revégétalisation de sites difficiles, afin de mettre au point le protocole de phytostabilisation innovant basé sur les espèces métallocoles du site.

Les travaux ont été réalisés entre septembre 2021 et mars 2022 par la société MTPS (terrassement et génie civil), qui a fait appel à des entreprises spécialisées dans différents domaines de compétences : Alpes Azur Environnement (semis hydrauliques), ATP Environnement (génie écologique), Irrimed (installation de pompage et d'irrigation), Colas (voirie).

### La mise en sécurité des haldes des Avinières

L'objectif des travaux de mise en sécurité des haldes des Avinières est la suppression des voies de transfert des ETM par érosion et envol de poussières avec la mise en place d'un couvert végétal pérenne permettant de fixer les stériles et d'un réseau efficace de gestion des eaux pluviales.

Les études préalables ont permis de démontrer que grâce au contexte géologique carbonaté du site (dolomies du Bathonien – Jurassique moyen), le caractère basique des eaux souterraines ne permet pas la mise en solution des métaux et leur migration vers les nappes phréatiques. C'est pourquoi les solutions de mise en sécurité n'ont pas retenu la mise en œuvre de couvertures étanches par-dessus les stériles et résidus miniers. Les problématiques posées par les haldes sont les fortes



© Mica Environnement

Terrassement et amendement en compost des stériles miniers.



© Mica Environnement

Semis hydrauliques des talus recouverts de géofilet en fibres de coco, après installation du réseau d'arrosage.

pententes selon lesquelles elles ont été déversées (entre 35° et 37°) et l'érosion intense auxquelles elles sont soumises (éolienne et hydrique, notamment lors des épisodes pluvieux cévenols auxquels est soumise la région). Cette érosion intense, couplée aux fortes teneurs en ETMs des stériles ainsi qu'à leur pauvreté en éléments nutritifs, n'a pas permis le développement d'une couverture végétale par-dessus les haldes, bien que le site ait été laissé en l'état depuis plus de 100 ans.

Les travaux ont été réalisés en plusieurs étapes :

- Terrassement des haldes pour abaisser la pente des talus à 27° environ, permettant de garantir leur stabilité à long terme. Les terrassements ont été réalisés en déblais-remblais équilibrés sur place afin de n'exporter ou importer aucun matériau du site.
- Amendement des stériles par l'apport de compost enrichis en MIATEs. (Matières d'intérêt agronomique issues du traitement des eaux – boues de stations d'épurations). Ce compost a été brassé aux stériles, de manière homogène et sur une épaisseur de 30 cm.
- Mise en place d'un géofilet biodégradable en fibres de coco par-dessus les talus amendés afin de retenir les graines lors du semis et de fixer les stériles tassés jusqu'au développement de la couverture végétale.
- Création d'un réseau de gestion des eaux de ruissellement afin de protéger les talus de l'érosion hydraulique, canaliser les écoulements et les restituer à l'aval. Les parcelles du site appartiennent à la commune et aucun usage spécifique de ces parcelles n'est prévu. Les ouvrages de gestion des eaux réalisés ont donc été dessinés de manière à être robustes dans le temps et à ne nécessiter que très peu d'entretien. Les descentes d'eau ont été protégées par des enrochements bétonnés et les ouvrages ont été dimensionnés pour pouvoir évacuer le débit correspondant à un épisode pluvieux centennal.
- Mise en place d'un système d'arrosage avec une installation de pompage dans la Vis et un réseau d'irrigation sur l'ensemble du site.

### L'action de l'Ademe concernant les sites à responsables défaillants

Au titre du principe pollueur-payeur énoncé par le code de l'environnement, les obligations environnementales de prévention, de réduction et de réparation des pollutions engendrées par une installation classée pour la protection de l'environnement (ICPE) sont sous la responsabilité de celui qui l'exploite ou en assure la garde.



En cas de défaillance de ce responsable à assumer ses obligations et lorsqu'il y a une menace grave pour les populations et/ou l'environnement, l'Ademe, en application de l'avis du 29 mars 2023 du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires et du code de l'environnement, a pour mission de prendre en charge la maîtrise d'ouvrage des opérations de mise en sécurité.

Cette mission intervient sur décision des pouvoirs publics, garants de la santé et de la sécurité publiques, lorsque les actions engagées par l'État à l'encontre des responsables se sont avérées infructueuses.

Dans ce cas, l'Ademe assure la définition des conditions techniques et financières de réalisation, la planification, l'organisation et le suivi des opérations.

La notion de responsable défaillant recouvre de multiples situations. Dans la majorité des cas, le responsable désigné est le dernier exploitant d'une installation classée. Cependant, selon les textes en vigueur et la jurisprudence, la recherche de responsabilité peut être étendue à celle du producteur ou du détenteur des déchets, des biens meubles ou des immeubles contaminés, mais aussi le propriétaire de l'exploitation, des bâtiments ou du terrain.

Le responsable est jugé défaillant lorsqu'il a manqué à ses obligations au titre de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement, et n'a pas donné suite aux mesures de protection environnementale ordonnées à son encontre par les autorités administratives.



Haldes des Avinières, avant et après réaménagement.

– Semis hydraulique des zones terrassées avec un mélange comportant des amendements organiques et organo-minéraux, des fixateurs et conditionneurs de sols, des graines métalloles issues des récoltes de la pépinière et du bio-fertilisant. Le semis hydraulique a été réalisé en deux passages, au printemps et à l'automne 2022.

Les zones de bordures des haldes très pentées et difficilement accessibles par des engins de terrassement, ont été traitées par la mise en place manuelle de fascines de branchage et la plantation et semis d'espèces métalloles en amont des fascines, après apport de compost.

Les fascines permettent de casser les écoulements le long des talus, de retenir les sédiments et l'humidité, et de créer ainsi des micro-environnements favorables au développement de la végétation.

Le site étant situé en zone méditerranéenne, un épisode de sécheresse la première année aurait pu compromettre la bonne installation du couvert végétal. La

production des semences métalloles étant compliquée et celles-ci ne pouvant pas être rachetées dans le commerce, les fascines et zones ensemencées ont été arrosées les premières années afin de garantir la germination et l'implantation du couvert végétal. La quantité d'eau apportée a été pilotée en fonction des précipitations enregistrées sur le site et l'apport d'eau est progressivement réduit afin de ne pas accoutumer les plantes et de pouvoir couper définitivement l'arrosage à compter de 2027.

Enfin, des entrées d'anciennes galeries minières étant présentes sur le site, elles ont dû être mises en sécurité. Un inventaire chiroptérologique a été préalablement 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, sous forme de murs en béton armé équipés de meurtrières à barreaux dimensionnés pour permettre l'accès des chauves-souris à l'intérieur des cavités.



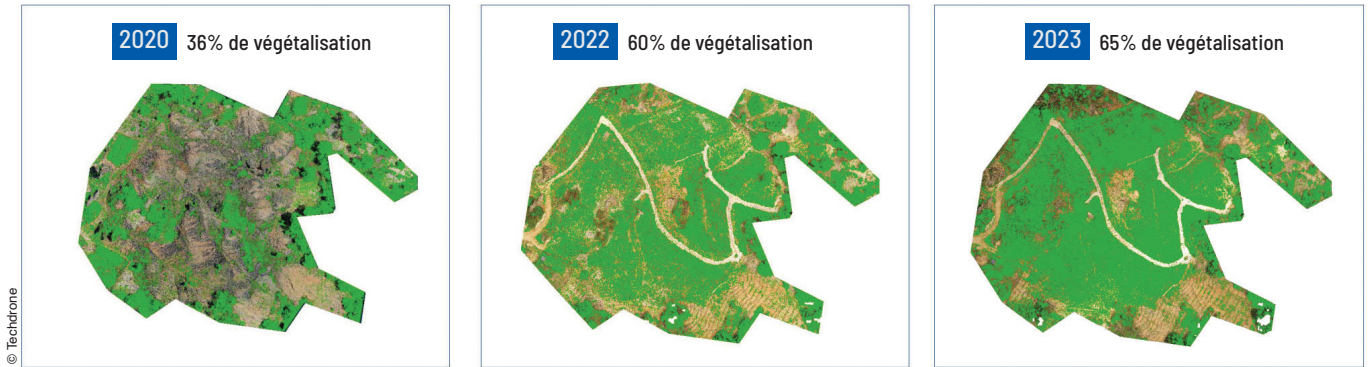
Murage de l'entrée d'une galerie avec conservation d'un accès pour les chiroptères.

### Le suivi de la couverture végétal

Depuis la fin des travaux, le couvert végétal est régulièrement suivi par Fertil'Innov Environnement et aucun travail de reprise de la couverture végétal n'a été nécessaire. La végétation en place présente une densité et une diversité exceptionnelle.

Des campagnes d'arrachages d'Espèces végétales exotiques envahissantes (EVEE), comme les ailantes ou les buddleias, ont été réalisées sur les Avinières afin d'éviter leur prolifération au niveau du nouveau couvert végétal.

Le taux de couverture végétal du site est aussi monitoré par drone afin d'avoir un suivi exhaustif sur plusieurs années. Une analyse numérique automatisée des photographies prises par drone du site permet de



Suivi du couvert végétal sur 22 030 m<sup>2</sup> en 2020, 2022 et 2023.



© Mica Environnement

Densité du couvert végétal, 2 ans après la fin des travaux.

calculer le pourcentage de la surface du site couvert par la végétation.

Avant travaux (2020), le site présentait un taux de couverture végétal de 36 %.

Six mois après la fin des travaux (09/2022), le taux de couverture végétal était de 60 % et il s'établissait à 65 % un an après la fin des travaux (2023).

Ces résultats montrent une excellente implantation du couvert végétal et une dynamique de colonisation des derniers espaces résiduels encore non couverts par la végétation implantée.

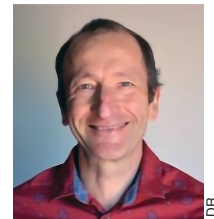
Mais la grande réussite des travaux est la rapidité à laquelle s'est développé le couvert végétal (taux de couverture de 60 % seulement 6 mois après la fin du chantier). De tels taux de couverture et densité végétale sont généralement observés plusieurs années après la fin des travaux sur des chantiers de réaménagement "classiques".

Ces résultats démontrent bien l'intérêt et l'efficacité du protocole végétal établi pour des chantiers où la phytostabilisation doit être déployée rapidement après les terrassements afin de fixer les sols remaniés par les travaux (cas de sites à enjeux sanitaires importants, comme celui des Avinières). ■

*Pierre Rossler, Mica Environnement*

## Hommage à Patrick Jacquemin

Patrick Jacquemin a été le chef de projet en réhabilitation de sites pollués de l'Ademe qui a porté le projet de mise en sécurité du site des Avinières depuis les premières études préliminaires jusqu'à la finalisation des travaux.



DR

Fort de plus de 30 années au sein du service Sites et Sols pollués de l'Ademe sur des sites miniers compliqués (mine d'or de Salsigne, mine d'or du Châtelet, carrière d'amiante de Canari, ...), sa riche expérience a été un facteur clé dans la réussite des travaux de mise en sécurité du site des Avinières.

Patrick était perfectionniste, tant au niveau des études que de la réalisation des travaux, tout en étant toujours très pragmatique quant aux solutions à mettre en œuvre sur le terrain.

Grâce à son esprit d'ouverture et sa curiosité, il était toujours avide de questionner les choses, comprendre les phénomènes, toujours dans l'optique de mieux cerner les problèmes afin d'y apporter la meilleure solution.

C'est cet état d'esprit qui a permis de mettre en œuvre des solutions innovantes, comme la technique de phytostabilisation à l'aide de plantes métallophiles utilisées sur le site des Avinières.

Décédé brutalement en décembre 2022, Patrick a tout de même pu assister à l'aboutissement du chantier et la mise en place de la couverture végétale des stériles. Les résultats des travaux, deux ans après leur achèvement, nous prouvent que sa vision était la bonne.



© Mica Environnement

## Réaménagement avec des techniques modernes

# Phytostabilisation des haldes miniers de l'ancien site minier des Avinières

La méthodologie de la phytostabilisation mise en œuvre sur le site des Avinières est un exemple d'une approche moderne de végétalisation sur un site à réaménager.

La zone des Avinières, qui surplombe la rive gauche de la vallée de la Vis, a été exploitée principalement à ciel ouvert. L'exploitation a aussi été en partie réalisée en souterrain, le long de petites galeries suivant les axes de minéralisation. Les stériles d'exploitation étaient poussés en bordure des niveaux et déversés à flanc de coteau (figure 1).

### Une utilisation innovante de la flore autochtone pour une revalorisation écologique d'un site minier

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, jusque dans les années 1950. Fours de calcination et de grillage, laveries et usines de flottation se sont ainsi installés pour traiter le minerai exploité dans d'autres mines de la commune. Cette activité industrielle a conduit à la formation de dépôts de résidus contaminés dans l'environnement du site des Avinières et du hameau de la Papeterie, notamment de cinq bassins situés en bord de la Vis, et contenant au total 40 000 m<sup>3</sup>

de résidus de traitement du minerai dont les teneurs vont de 1 à 5 % en plomb et 4 à 13 % en zinc.

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 eu lieu dans le courant des années 2000.

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. Un plan de gestion est alors élaboré par les bureaux d'études Tesora et Eaugeo, mettant en évidence les enjeux sanitaires du site et les voies d'exposition, et proposant différentes solutions de mise en sécurité. Il est ressorti de cette étude que les riverains du hameau de la Papeterie subissaient une exposition aux métaux (plomb et zinc principalement, mais aussi cadmium et arsenic) du fait des envols de poussières issues des haldes des Avinières et des bassins de résidus, situés dans un rayon de 500 m.

L'autre voie de contamination de l'environnement est l'érosion intense subie par les haldes lors des évène-



Figure 1 : vue aérienne du site des Avinières avant travaux de réhabilitation.

ments pluvieux cévenols qui entraîne vers la Vis d'importantes quantités de stériles riches en métaux. Par arrêté préfectoral de travaux d'office n° 2019-04-010 du 8 avril 2019, l'Ademe a donc été mandatée pour conduire la mise en sécurité du site des Avinières. Les travaux ont consisté, entre autres opérations, à la végétalisation de la verse de stériles des Avinières afin de réduire l'émission de poussières chargées en Éléments Traces Métalliques (ETMs) et notamment en plomb qui présente un danger pour la population habitant en contrebas.

### Méthodologie de la phytostabilisation des Avinières : étapes et approche

La réhabilitation du site des Avinières comprend plusieurs phases. Avec l'assistance de Fertill'Innov Environnement, la démarche intègre la phytostabilisation pour stabiliser les haldes miniers, réduire l'érosion et maîtriser la dispersion des ETMs.

### Contrôle et amélioration de la qualité du substrat minier

L'analyse des propriétés du substrat minier a été une première étape indispensable pour déceler les facteurs limitant la croissance des végétaux et définir les améliorations à apporter afin d'accélérer et de pérenniser l'installation d'une couverture végétale dense sur l'ensemble du site. Outre la forte charge en ETMs (5 % de plomb, 10 % de zinc), le substrat avait une faible teneur en matière organique et en éléments nutritifs indispensables à la croissance des plantes. Une stratégie particulière a été développée pour apporter des amendements à forte teneur en composés organiques.

### Essais en laboratoire

Des semences de toutes les espèces autochtones ont été récoltées puis testées en laboratoire afin de déterminer leur niveau de tolérance aux ETMs. Nous avons ainsi identifié 18 espèces végétales adaptées aux conditions du site et tout un ensemble de microorganismes symbiotiques. Des espèces végétales non tolérantes aux conditions du site (espèces du commerce) ont été également impliquées.

### Phytostabilisation : une solution écologique pour les sites pollués

**Définition :** La phytostabilisation est une technique de réhabilitation des sols pollués qui utilise des plantes pour stabiliser les contaminants présents dans le sol. Contrairement à la phytoextraction, qui vise à extraire les polluants, la phytostabilisation se concentre sur la réduction de leur mobilité et de leur biodisponibilité, empêchant ainsi leur dispersion dans l'environnement et leur absorption par les organismes vivants.

**Intérêt :** Cette méthode offre plusieurs avantages écologiques et économiques. Elle améliore la qualité des sols en réduisant l'érosion et en limitant les risques de contamination des eaux souterraines. De plus, la phytostabilisation est généralement moins coûteuse que les techniques physico-chimiques, tout en contribuant à la restauration des habitats naturels. En utilisant des plantes adaptées aux conditions locales, elle favorise également la biodiversité et crée des espaces verts durables.

Sur les 18 espèces végétales autochtones testées, 10 ont été retenues pour la phytostabilisation du site dont 3 espèces appartenant à la famille des légumineuses. Les espèces hyperaccumulatrices (plantes capables d'absorber et de concentrer des niveaux élevés de ETMs dans leurs tissus aériens) ont été écartées afin de préserver la chaîne alimentaire. Grâce aux essais de croissance en pots, nous avons pu démontrer que seules les espèces végétales autochtones étaient adaptées à la contrainte exercée par la présence des fortes teneurs en ETMs dans le substrat du site (figure 2).

### Mise en place d'une pépinière *in situ* pour multiplier les espèces autochtones

Les essais en laboratoire ont montré qu'il était indispensable d'envisager la multiplication des espèces végétales locales dans un espace du site afin de les placer dans des conditions adéquates et ainsi pouvoir disposer de suffisamment de matériel végétal pour l'ensemencement.

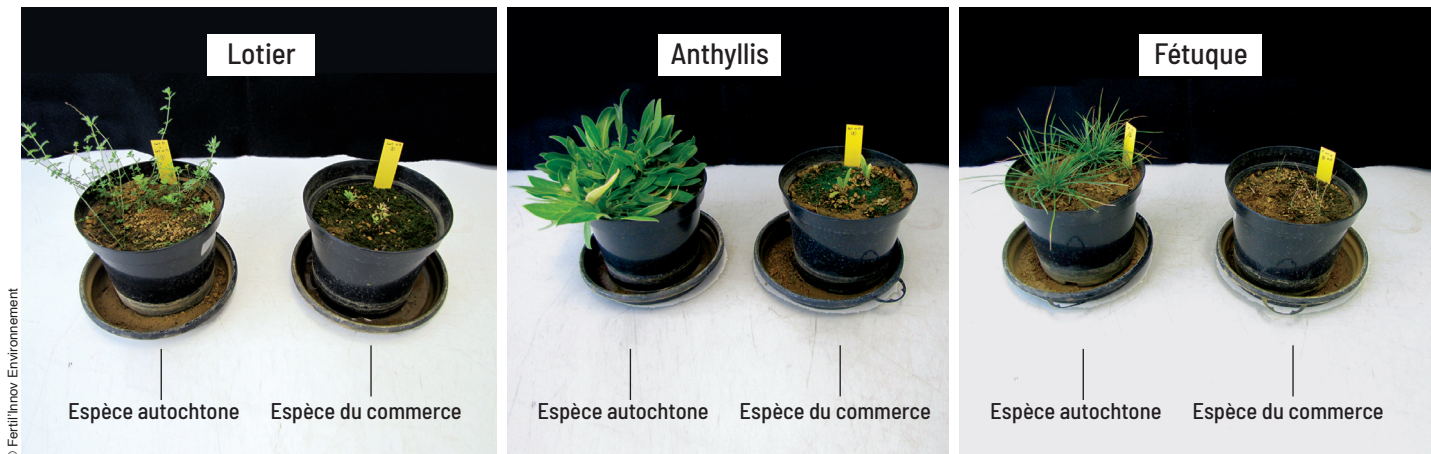


Figure 2 : Différence de croissance des espèces autochtones et des espèces du commerce sur le substrat des Avinières.



© FertillInnov Environnement

Figure 3 : pépinière mise en place pour multiplier les espèces végétales autochtones.

mencement du site des Avinières, après les travaux de terrassement. La pépinière a été mise en place en 2019. Son suivi constant et rigoureux par FertillInnov Environnement a conduit à une production de semences dès la première année et cette production a été constante sur les trois années d'entretien de la pépinière (figure 3). Une réserve de 174 kg de semences a ainsi été obtenue.

### Essais *in situ*

Avant de procéder à la réhabilitation de l'ancienne mine, des essais *in situ* ont été réalisés afin de confirmer l'efficacité de l'apport de matières organiques et d'optimiser l'association des différentes espèces végétales et microbiennes permettant de couvrir rapidement les stériles miniers. Les essais sur site ont montré qu'avec les espèces autochtones, il était possible de phytostabiliser les haldes des Avinières (figure 4). L'incorporation de compost de déchets verts enrichi avec des MIATEs (Matières d'Intérêt Agronomique issues du Traitement des Eaux) a permis d'apporter des matières organiques de qualité levant les carences en éléments majeurs et en oligo-éléments indispensables à la croissance des plantes.



© FertillInnov Environnement

Figure 4 : essais pilote installés au niveau des haldes des Avinières.

L'apport d'eau pendant la phase d'installation de la couverture végétale a été un facteur clé pour la réussite de la phytostabilisation des Avinières.

La toile de coco au niveau des zones en pentes a présenté un effet positif sur le développement initial des végétaux.

### Travaux de phytostabilisation des haldes des Avinières

**Travaux de terrassement du site :** l'objectif de ces travaux était d'atténuer les fortes pentes des haldes afin d'améliorer leur stabilité, de limiter l'érosion de surface et de favoriser la reprise de la végétation. Les travaux de terrassement ont été réalisés en déblais-remblais équilibrés par zone, avec de petits engins mécanisés, et sous brumisation continue afin de prévenir l'émission de poussières. Un suivi environnemental de l'air et de l'eau a été également réalisé pendant les travaux, afin de vérifier l'absence d'impact des travaux sur l'environnement.

**Amendement du substrat :** pour garantir le bon développement de la végétation, un amendement organique à base de compost de déchets verts enrichi avec des MIATEs a été apporté. Une attention particulière a été accordée aux quantités de compost et à l'homogénéité de l'incorporation du compost dans les 30 premiers centimètres du substrat minier à travers la réalisation de contrôles spécifiques et réguliers du substrat après préparation. Des géofilettes en fibres de coco ont par la suite été agrafés sur les talus pour favoriser l'accroche des semences.

### Mise en place du système d'irrigation

Afin de garantir la germination et le développement correct des plantes autochtones durant les premières années, il a été nécessaire de mettre en place un système d'irrigation. Les apports d'eau ont été programmés pour favoriser le développement du système racinaire des plantes en profondeur.

### Travaux de végétalisation

Le semis final des plantes autochtones a été effectué par semis hydraulique réalisé en deux passages, au printemps et à l'automne 2022.

### Surveillance de la végétation : clé de la réussite

Un suivi rigoureux de la zone végétalisée est en cours et sera maintenu jusqu'en 2026. Cette surveillance vise à contrôler l'implantation de la végétation et à apporter les ajustements nécessaires pour optimiser le développement de la couverture végétale.

À la fin de la première année après les semis, le recouvrement a atteint le taux de 65 %, confirmant ainsi le succès initial de l'opération (figure 5).

Parallèlement, le système racinaire des plantes a réussi à pénétrer jusqu'à une profondeur de 30 cm, ce qui contribue à une stabilisation efficace des sols et à une réduction notable de l'érosion hydrique et éolienne (figure 6).



Figure 5 : un couvert végétal bien installé sur le site des Avinières, 2 ans après les travaux de phytostabilisation.

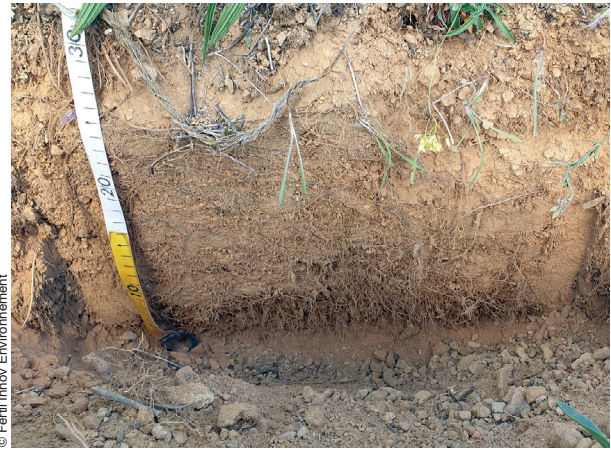


Figure 6 : profondeur d'enracinement des végétaux, 2 ans après le semis.

L'évolution des caractéristiques du substrat montre une amélioration significative de sa structure après deux ans de phytostabilisation avec une augmentation des matières organiques et de la teneur en azote soulignant le succès du projet de phytostabilisation et de la réactivation du milieu (figure 7).

### Conclusion

Le projet de réhabilitation de l'ancienne mine des Avinières illustre une approche novatrice et réussie de la phytostabilisation. L'utilisation d'espèces végétales autochtones a contribué à fixer les contaminants métalliques et à préserver la biodiversité locale. Ce projet démontre l'efficacité des méthodes d'ingénierie écologique et leur capacité à transformer des sites miniers orphelins en environnements stabilisés et revitalisés. ■

*Souhir Soussou, Fertil'Innov Environnement*

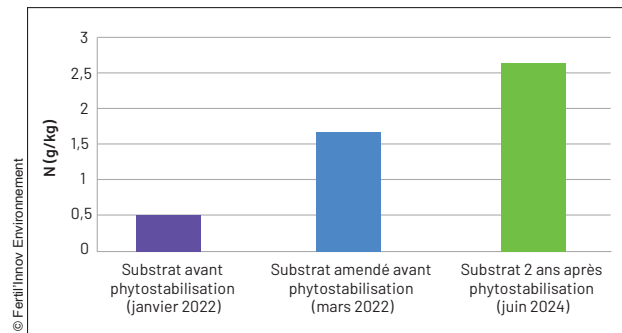
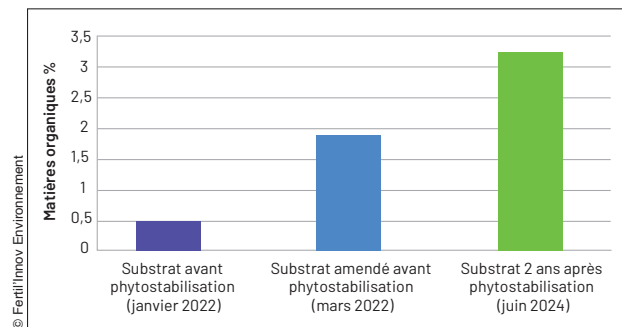


Figure 7 : enrichissement du substrat en matières organiques et en azote grâce à la phytostabilisation des Avinières.

### Remerciements

La mairie de Saint-Laurent-le-Minier est propriétaire d'une partie des terrains concernés par les travaux de mise en sécurité. Elle est régulièrement informée de l'avancée des opérations et donne les autorisations sur les aspects relevant de son autorité.

Nous tenons à remercier l'ensemble des partenaires qui ont veillé au bon déroulement des travaux.

Pour réaliser les travaux de mise en sécurité du site, l'Ademe (maîtrise d'ouvrage) a fait appel à des prestataires. La conception et le suivi des travaux (maîtrise d'œuvre) sont assurés par Mica Environnement, assisté pour la partie technique concernant la phytostabilisation par les experts de Fertil'Innov Environnement (Assistant à Maîtrise d'Ouvrage).

La réalisation des travaux a été confiée à l'entreprise MTPS et ses sous-traitants ; la surveillance environnementale, à Antea Group ; et enfin, la coordination de la sécurité et de la protection de la santé, à Alpes Contrôle.

## Conclusions

# L'opération de réaménagement menée sur le site des Avinières est une réussite totale

La remise en état de la mine à ciel ouvert était une opération *a priori* difficile ; la pente était importante, et le site très raviné, comme le montre la figure 1.

La mise en ordre des pentes a été réalisée avec succès, et, dès mars 2022, aucune trace du site d'exploitation ne subsistait (figure 2).

La première saison de pousse de la végétation allait confirmer cette situation (figure 3) et le printemps suivant la confirmer définitivement (figure 4).

La réalisation est par ailleurs tout à fait en ligne avec le projet paysager initial, ce qui démontre la capacité technique des différentes sociétés concernées à faire des propositions réalistes (figure 5).

L'opération menée aux Avinières est certes une belle opération environnementale. Elle a cependant une portée beaucoup plus large.

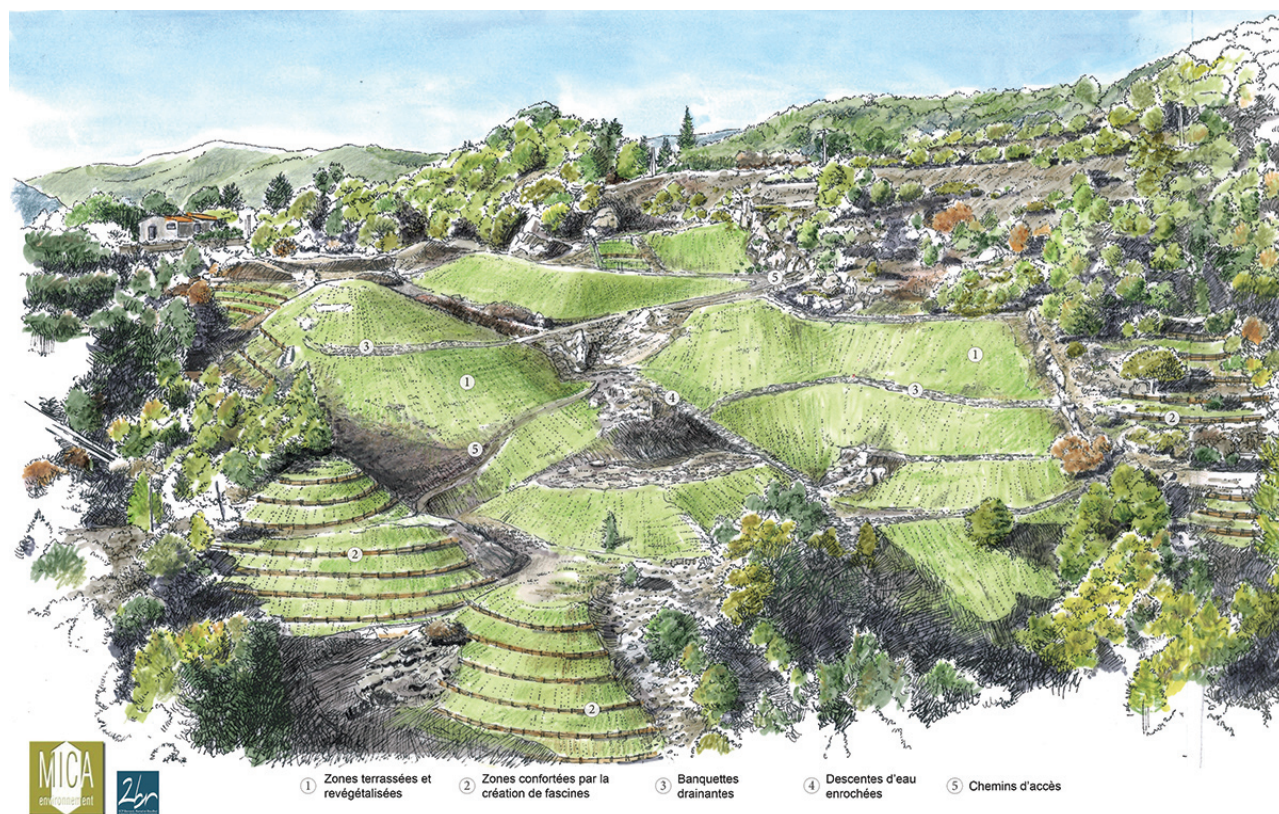
En effet, les nombreuses anciennes mines du territoire français métropolitain ont été abandonnées à des périodes variées par des opérateurs dont certains ont disparu – l'État assume alors la responsabilité de "l'après-mine".

Ces fermetures du passé ont eu lieu dans des conditions qui sont toujours bien loin des normes actuelles, et laissent des traces de dimension variable dans les



Figure 1 : photo prise par drone avant le réaménagement.

© Techdrone



© Dessin Gilles Bernard - Source 2BR



- ① Zones terrassées et revégétalisées
- ② Zones confortées par la création de fascines
- ③ Banquettes drainantes
- ④ Descentes d'eau enrochées
- ⑤ Chemins d'accès

Figure 5 : visualisation paysagère d'origine du projet de réaménagement.



Figure 2 : photo prise en mars 2022.



Figure 3 : photo prise en septembre 2022.



Figure 4 : photo prise en mai 2023.

paysages ; plus de 2 000 sites de stériles miniers ont été recensés par Geoderis en France métropolitaine. Il en résulte une perception négative de l'industrie minière qu'il est important de modifier à une époque où de nouveaux besoins de métaux émergent, par exemple pour l'électrification des activités économiques, auxquels de nouvelles exploitations peuvent contri-

buer. La démonstration des capacités à corriger les effets de l'exploitation prend alors un sens qui dépasse la remise en état au bénéfice des populations voisines des sites pour être un facteur favorable à la transition de l'économie et de la compétitivité du pays. ■

*Alain Liger, président du district Occitanie de la Sim  
Pierre Rossler, Mica Environnement*